

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky**

**Rozšíření funkcí řízeného usměrňovače pro laboratorní výuku
Extending the Functions of Controlled Rectifier for Laboratory
Exercises**

2018

Bc. Radomír Vasický

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Radomír Vasický

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Rozšíření funkcí řízeného usměrňovače pro laboratorní výuku
Extending the Functions of Controlled Rectifier for Laboratory
Exercises

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor laboratorních úloh s řízeným usměrňovačem (ŘU) v předmětech výkonové elektroniky.
2. Analyzujte funkce a činnosti řídicího systému pro řízení ŘU.
3. Navrhněte programové vybavení řídicího systému pro ŘU včetně ovládacího sw pro PC.
4. Ověřte vlastnosti ŘU měřením, vytvořte vzorové protokoly.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího závěrečné práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Sobek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 25. dubna 2018


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Martinu Sobkovi, Ph.D za odbornou pomoc a cenné rady při realizaci této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je rozšíření funkcí řízeného usměrňovače pro laboratorní výuku. Práce se skládá z teoretického rozboru jednotlivých laboratorních úloh s řízeným usměrňovačem z předmětů výkonové elektroniky. Následně je analyzována funkce řídicího systému pro řízený usměrňovač. V další části diplomové práce je popsáno programové vybavení řídicího systému a popis použitého ovládacího softwaru pro PC. V závěrečné části je měřením ověřena funkčnost a vlastnosti řízeného usměrňovače.

Klíčová slova

Codewarrior, Digitální signálový kontrolér, Freemaster, Jednofázový usměrňovač, MC56F8037, Řídicí systém, Řízený usměrňovač, Šestipulzní usměrňovač, Třífázový usměrňovač.

Abstract

The goal of this master thesis is to expand the functions of controlled rectifier for laboratory exercises. This thesis consists of theoretical analysis of individual controlled rectifier laboratory exercises from power electronic classes. Next, the function of control system for controlled rectifier is analyzed. The subsequent part describes the software of the control system and the control software used for PC. The last part checks the functionality and characteristics of controlled rectifier.

Key Words

Codewarrior, Control System, Controlled Rectifier, Digital Signal Controller, Freemaster, MC56F8037, Single Phase Rectifier, Six Pulse Rectifier, Three Phase Rectifier

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 6 -
Seznam použitých zkratk.....	- 8 -
Seznam ilustrací	- 9 -
Úvod.....	- 12 -
1 Teoretický rozbor vybraných vlastností usměrňovačů.....	- 13 -
1.1 Řídicí charakteristiky usměrňovačů.....	- 14 -
1.1.1 Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače.....	- 14 -
1.1.2 Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače	- 15 -
1.2 Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje na komutaci ŘU	- 16 -
1.3 Zatěžovací charakteristika usměrňovače.....	- 18 -
1.4 Zpětné vlivy usměrňovačů	- 20 -
1.4.1 Kmitočtové spektrum napájecího fázového proudu ŘU.....	- 22 -
1.4.2 Kruhový diagram.....	- 23 -
2 Řídicí systém řízeného usměrňovače	- 25 -
2.1 DSC 56F8037.....	- 25 -
2.2 Měření napětí a proudů	- 27 -
2.3 Řízení tyristorů.....	- 27 -
2.4 Komunikace s PC.....	- 29 -
3 Programové vybavení řídicího systému	- 30 -
3.1 Inicializace a zadní program	- 30 -
3.2 Přerušení isr_pit0	- 31 -
3.3 Přerušení isr_adc	- 31 -
3.3.1 Kalibrace	- 31 -
3.3.2 Synchronizace	- 33 -
3.3.3 Algoritmus ŘU	- 36 -
3.4 Ovládací software pro PC	- 41 -
4 Ověření funkce řízeného usměrňovače	- 49 -
Závěr	- 57 -
Použitá literatura	- 58 -
Seznam příloh.....	- 59 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
α	°	Řídicí úhel
α_{bezp}	°	Bezpečnostní úhel
φ_1	°	Fázový posun
λ	-	Skutečný účinník
τ_{dp}	s	Časová konstanta filtru
μ	°	Komutační úhel
ω	rad·s ⁻¹	Úhlový kmitočet
A_{dp}	-	Konstanta filtru
B_{dp}	-	Konstanta filtru
D	VA	Deformační výkon
E	V	Napětí
f_{dp}	Hz	Mezní lomová frekvence filtru
I_1	A	Amplituda první harmonické odebíraného proudu
I_d	A	Střední hodnota usměrněného proudu
I_n	A	Amplituda n-té harmonické
i_{v1}, i_{v2}	A	Okamžitá hodnota fázového proudu
k	-	Celé číslo
L_k	H	Komutační indukčnost
L	H	Indukčnost tlumivky
U_{dAV}	V	Střední hodnota usměrněného napětí
U_{dF}	V	Komutační napětí
U_{dR}	V	Úbytek na činných odporech
U_{dx}	V	Úbytek na reaktanci napájecího zdroje
U_{km}	V	Úbytek na polovodičových součástkách
U_m	V	Amplituda fázového napětí
U_{RMS}	V	Efektivní hodnota fázového napětí
u_{v1}, u_{v2}	V	Okamžitá hodnota fázového napětí
P	W	Činný výkon

Seznam použitých symbolů

p	-	Pulsnost usměrňovače
Q	VAr	Jalový výkon
Q_{Lk}	Wb	Napět'ové množství
R	Ω	Odpor
R_U	Ω	Ekvivalentní odpor usměrňovače
S	VA	Zdánlivý výkon
THD	-	Harmonické zkreslení
T_{vz}	s	Vzorkovací perioda filtru

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
A/D	Analogově digitální převodník
D/A	Digitálně analogový převodník
DSC	Digital Signal Controller
EOnCE	Enhanced On-Chip Emulation
GPIO	General Purpose Input/Output
JTAG	Join Test Action Group
OSC	Oscilátor
PC	Personal Computer
QSCI	Queued Serial Communication Interface
QSPI	Queued Serial Peripheral Interface
ŘU	Řízený usměrňovač
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Seznam ilustrací

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Schéma zapojení dvojpulzního usměrňovače	13
1.2	Schéma zapojení šestipulzního usměrňovače	13
1.3	Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače	14
1.4	Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače	15
1.5	Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače se zdrojem napětí v zátěži	16
1.6	Schéma zapojení trojpulsního usměrňovače a průběh komutace	17
1.7	Závislost $\mu = f(\alpha)$	18
1.8	Ideální zatěžovací charakteristika	19
1.9	Reálná zatěžovací charakteristika	20
1.10	Průběh fázového proudu šestipulzního usměrňovače	21
1.11	Diagram složek výkonů	22
1.12	Kruhový diagram šestipulzního usměrňovače	23
2.1	Blokové schéma řídicího systému řízeného usměrňovače	25
2.2	Schéma zapojení k úpravě napěťových úrovní pro A/D převodník	27
2.3	Schéma zapojení budiče tyristoru	28
2.4	Průběh proudu I_G	28
2.5	Zapojení převodníku FT232RL	29
3.1	Zjednodušený vývojový diagram řídicího systému řízeného usměrňovače	30
3.2	Vývojový diagram přerušení pit0	31
3.3	Vývojový diagram kalibrace	32
3.4	Vývojový diagram synchronizace a kruhového registru	33
3.5	Synchronizace pilového průběhu se sdruženým napětím	35
3.6	Vývojový diagram zapínání a volby řízeného usměrňovače	36
3.7	Sled fází ABC	37
3.8	Sled fází ACB	37

3.9	Vývojový diagram řízeného šestipulzního usměrňovače	38
3.10	Stavový automat šestipulzního řízeného usměrňovače	39
3.11	Vývojový diagram stavového automatu šestipulzního usměrňovače	40
3.12	Vývojový diagram dvoupulzního usměrňovače	41
3.13	Prostředí programu Freemaster	42
3.14	Otevření vytvořeného projektu	42
3.15	Nastavení komunikace	43
3.16	Nahrání souboru elf	43
3.17	Nastavení html stránky	44
3.18	Prostředí programu freemaster s ovládacím panelem	44
3.19	Prostředí programu freemaster s ovládacím panelem	45
3.20	Přidání nové proměnné do variable watch	46
3.21	Vytvoření recorderu	46
3.22	Nastavení proměnné v recorderu	47
3.23	Nastavení triggeru recorderu	48
3.24	Nastavení nahrávaných vzorků rekordérem	48
4.1	Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 0^\circ$	49
4.2	Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 30^\circ$	49
4.3	Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 60^\circ$	50
4.4	Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 90^\circ$	50
4.5	Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače	51
4.6	Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače	51
4.7	Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače	52
4.8	Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače	52
4.9	Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při R zátěži $\alpha = 0^\circ$	53
4.10	Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při RL zátěži $\alpha = 45^\circ$	53

4.11	Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při RL+E zátěži $\alpha = 75^\circ$	54
4.12	Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při RL-E zátěži $\alpha = 90^\circ$	54
4.13	Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při R zátěži $\alpha = 0^\circ$	55
4.14	Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při RL zátěži $\alpha = 0^\circ$	55
4.15	Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při RL+E zátěži $\alpha = 75^\circ$	56
4.16	Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při RL-E zátěži $\alpha = 100^\circ$	56

Úvod

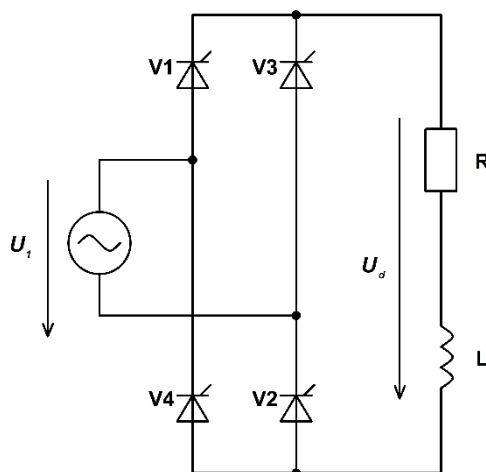
Cílem diplomové práce je rozšíření funkcí řízeného usměrňovače pro laboratorní výuku. Práce navazuje na diplomové práce z roku 2012 a 2016. V práci z roku 2012 byla vytvořena výkonová část řízeného usměrňovače. V druhé práci bylo vytvořeno programové vybavení pro řízený usměrňovač, které nebylo plně funkční a zadávání řídicích úhlů bylo složité. Rozšíření funkcí řízeného usměrňovače tedy spočívá hlavně ve vytvoření bezchybné synchronizace pilovitých průběhů se sdruženými napájecími napětími a ovládacího softwaru pro PC, který bude umožňovat jednoduché ovládání řízeného usměrňovače a přesné zadávání řídicích úhlů.

Diplomová práce se skládá ze čtyř kapitol. První kapitola se zabývá teoretickým rozborem měřených úloh z předmětů výkonové elektroniky. Další kapitola se týká popisu jednotlivých částí použitého řídicího systému. Ve třetí kapitole je popsáno programové vybavení řídicího systému. Popis je proveden pomocí vývojových diagramů jednotlivých částí vytvořeného softwaru. Tato kapitola také obsahuje návod k ovládání softwaru pro PC a jeho popis. Závěrečnou část práce tvoří ověření funkce, a to jak jednofázového, tak i trojfázového řízeného můstkového usměrňovače.

1 Teoretický rozbor vybraných vlastností usměrňovačů

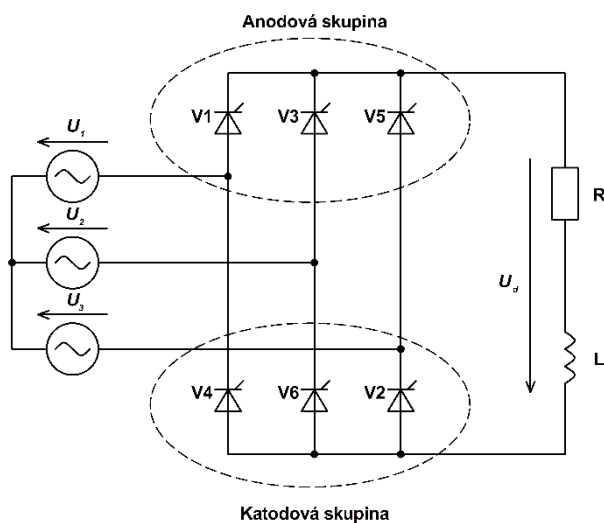
Řízené usměrňovače využívají ke své funkci tyristory. Tyristory jsou říditelné polovodičové součástky, které umožňují řízení usměrněného napětí. Na obrázku 1.1 je zobrazeno zapojení dvoupulzního řízeného usměrňovače a na obrázku 1.2 zapojení šestipulzního řízeného usměrňovače. [1]

Dvoupulzní usměrňovač se skládá ze čtyř tyristorů. Tyristory V_1 a V_3 se využívají k usměrnění kladné půlvlny napájecího napětí a V_2 a V_4 k usměrnění záporné půlvlny. [1]



Obrázek 1.1: Schéma zapojení dvoupulzního usměrňovače

Šestipulzní usměrňovač se skládá z šesti tyristorů. Tyristory jsou rozděleny do dvou komutačních skupin. Jedna skupina je nazývána anodová a druhá katodová. Tyristory patřící do anodové skupiny jsou připojeny k napájecímu zdroji anodou. Tyristory připojeny ke zdroji katodou patří do katodové skupiny. Anodová skupina slouží k usměrňování kladných půlvln napájecího napětí a katodová k usměrnění záporných půlvln. Z každé skupiny je vždy sepnut jeden tyristor. [1]



Obrázek 1.2: Schéma zapojení šestipulzního usměrňovače

1.1 Řídicí charakteristiky usměrňovačů

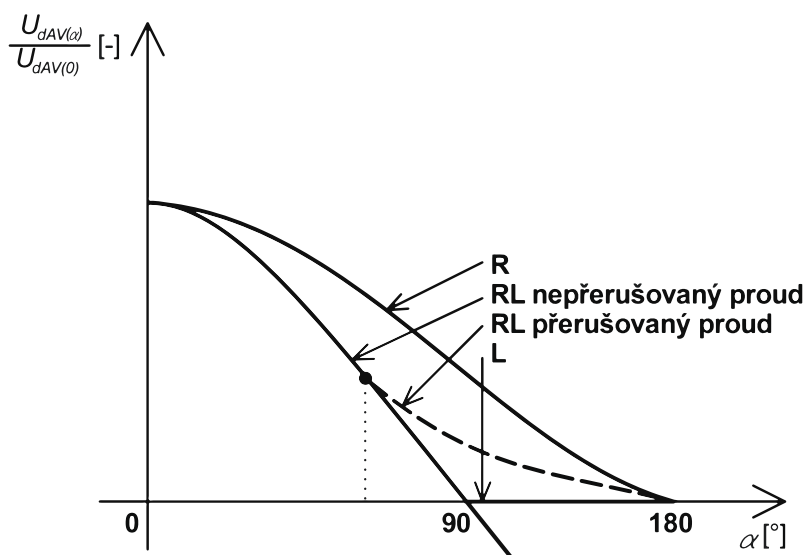
Řídicí charakteristika zobrazuje závislost střední hodnoty usměrněného napětí na řídicím úhlu. Pomocí této charakteristiky lze pozorovat průběh výstupního usměrněného napětí při změně řídicího úhlu při různých typech zátěže. Je také zvykem, vynášet ji v poměrných hodnotách. [1]

1.1.1 Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače

Na obrázku 1.3 jsou zobrazeny řídicí charakteristiky pro dvoupulzní usměrňovač pro zátěž typu R a RL. Tyto charakteristiky vychází ze vztahu pro výpočet $U_{dAV(\alpha)}$. Při čistě odporové zátěži se vychází ze vztahu 1.1 a při zátěži RL za předpokladu spojitého proudu ze vztahu 1.2. [1]

$$U_{dAV(\alpha)2p_R} = \frac{2}{2\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{RMS} \cdot (1 + \cos(\alpha)) = U_{dAV(0)} \cdot \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \quad (1.1)$$

$$U_{dAV(\alpha)2p_{spoj}} = \frac{2}{2\pi} \cdot \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = U_{dAV(0)} \cdot \cos(\alpha) \quad (1.2)$$



Obrázek 1.3: Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače [3]

Zátěž čistě odporová – Pokud je zátěž čistě odporová, usměrňovač není schopen pracovat ve střídačovém chodu. Řídicí úhel lze nastavovat v rozsahu $0 \leq \alpha < 180$. [3]

Zátěž RL s nepřerušovaným proudem – Při nepřerušovaném proudě je schopen usměrňovač ideálně pracovat v rozsahu řídicího úhlu jako s odporovou zátěží. Usměrňovač v rozsahu řídicího úhlu $0 \leq \alpha \leq 90$ se chová jako usměrňovač a na jeho výstupu je kladné usměrněné napětí. Bude-li řídicí úhel $\alpha \geq 90$, usměrňovač přejde do střídačového chodu a na výstupu bude záporné usměrněné napětí. [3]

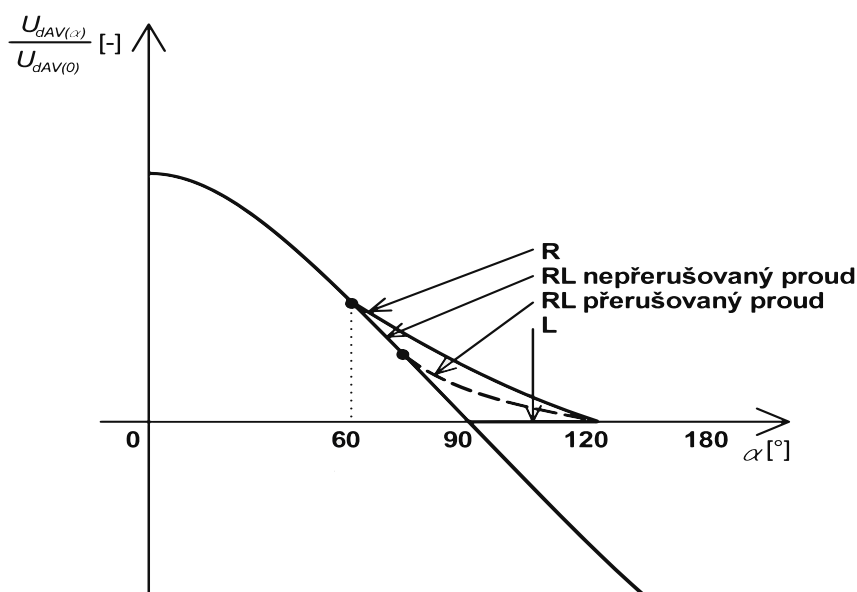
Zátěž RL s přerušovaným proudem – Pokud se bude měnit řídicí úhel α , bude se při nepřerušovaném proudě usměrněné napětí pohybovat po kosinovém průběhu. V závislosti na poměru zátěže RL dojde při určitém úhlu k přerušovanému proudě. V tomto okamžiku nebude možné použít vztah 1.2 pro výpočet usměrněného napětí. [3]

1.1.2 Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače

Pro šestipulzní usměrňovač jsou zobrazeny řídicí charakteristiky na obrázku 1.4. Při nepřerušovaném proudu se vychází ze vztahu 1.3. Pokud dojde k přerušovanému proudu při odporové zátěži, tak se vychází ze vztahu 1.4. [1]

$$U_{dAV(\alpha)6p_Spoj} = \frac{p}{\pi} \cdot U_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cdot \cos(\alpha) = U_{dAV(0)} \cdot \cos(\alpha) \quad (1.3)$$

$$U_{dAV(\alpha)6p_R} = \frac{6}{2\pi} \cdot \int_{\alpha+\frac{\pi}{3}}^{\pi} \sqrt{3}U_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{RMS} \cdot \left(1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\right) \quad (1.4)$$



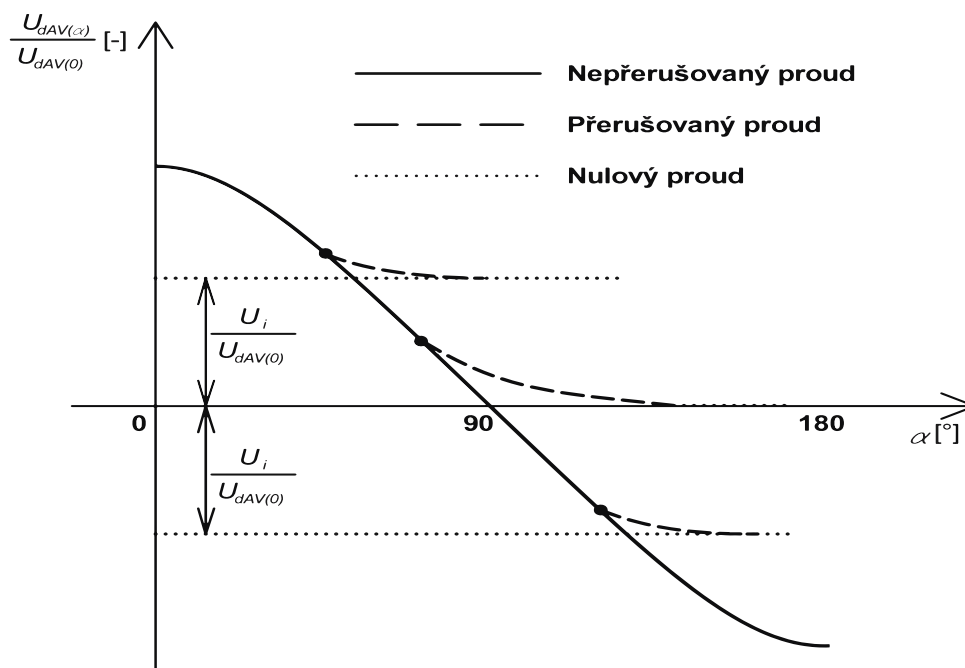
Obrázek 1.4: Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače [3]

Zátěž čistě odporová – Stejně jako u dvojpulzního usměrňovače není při odporové zátěži umožněn střídačový chod. Do řídicího úhlu $\alpha < 60$ je proud vždy nepřerušovaný. Od řídicího úhlu $\alpha > 60$ dochází k přerušovanému proudu. Usměrňovač je možné řídit v rozsahu řídicího úhlu $0 \leq \alpha < 120$. [3]

Zátěž RL s nepřerušovaným proudem – V režimu nepřerušovaného proudu při RL zátěži je možné usměrňovač řídit až do řídicího úhlu daného bezpečnostním úhlem $\alpha < 180 - \alpha_{bezp}$. Pokud by byl usměrňovač řízen s větším řídicím úhlem, tak by mohlo dojít k prohoření invertoru. Do řídicího úhlu $0 \leq \alpha \leq 90$ pracuje jako usměrňovač a na výstupu je kladné usměrněné napětí. Připojením stejnosměrného zdroje do zátěže a zvětšením řídicího úhlu nad $\alpha \geq 90$ bude usměrňovač ve střídačovém chodu. [3]

Zátěž RL s přerušovaným proudem – Od určitého řídicího úhlu dojde k přerušovanému proudu. Tato mez je závislá na poměru zátěže RL. Nachází-li se usměrňovač v tomto režimu, není možné použít vztah 1.3 pro výpočet usměrněného napětí. [3]

Dále je na obrázku 1.5 zobrazena řídicí charakteristika s přidáním zdroje napětí do zátěže. Řídicí charakteristika je zobrazena pro kladnou i zápornou polaritu zdroje napětí.

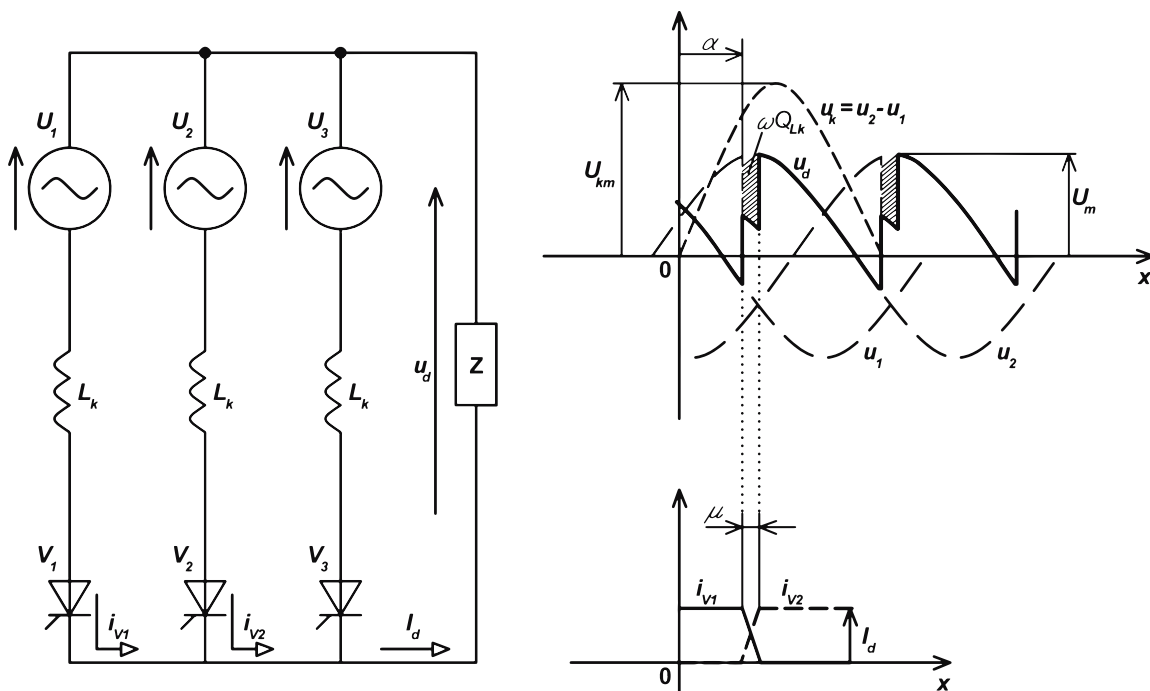


Obrázek 1.5: Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače se zdrojem napětí v zátěži [1]

1.2 Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje na komutaci ŘU

Každý reálný zdroj je charakterizován určitou vnitřní impedancí. Na komutaci řízeného usměrňovače má podstatný vliv vnitřní reaktance napájecího zdroje. Tato reaktance je tvořena převážně indukčností L_k , která neumožňuje okamžitou změnu proudu při komutaci. Z tohoto důvodu komutace probíhá určitý čas. [1,2]

Dále je vysvětlena komutace na trojpulsním usměrňovači. Komutace u trojfázového můstku probíhá pro každou komutační skupinu stejně jako u trojpulsního usměrňovače. Na obrázku 1.6 je zobrazeno schéma zapojení trojfázového uzlového usměrňovače a průběh komutace proudů z první fáze na druhou. [1]



Obrázek 1.6: Schéma zapojení trojpulsního usměrňovače a průběh komutace [1]

Prochází-li tyristorem V_1 proud a dojde při daném řídicím úhlu α k sepnutí tyristoru V_2 , začne docházet ke komutaci z V_1 na V_2 , jak je zobrazeno na obrázku 1.6, čímž začnou platit vztahy 1.5 a 1.6. [1,2]

$$i_{v1} + i_{v2} = I_d \quad (1.5)$$

$$L_k \left(\frac{di_{v2}}{dt} - \frac{di_{v1}}{dt} \right) = u_2 - u_1 \quad (1.6)$$

Ze vztahu 1.6 pak plyne, že $u_2 - u_1$ je napětí komutační. [1]

Z obrázku 1.3 je také vidět, že doba komutace trvá tak dlouho, dokud nenaroste proud i_{v2} na hodnotu proudu zátěže I_d a proud i_{v1} nepoklesne k nule. Nárůst proudu i_{v2} na hodnotu proudu zátěže I_d se vyznačuje komutačním úhlem μ . Konec komutace je tedy dán vztahem 1.7. [1,2]

$$x = \alpha + \mu \quad (1.7)$$

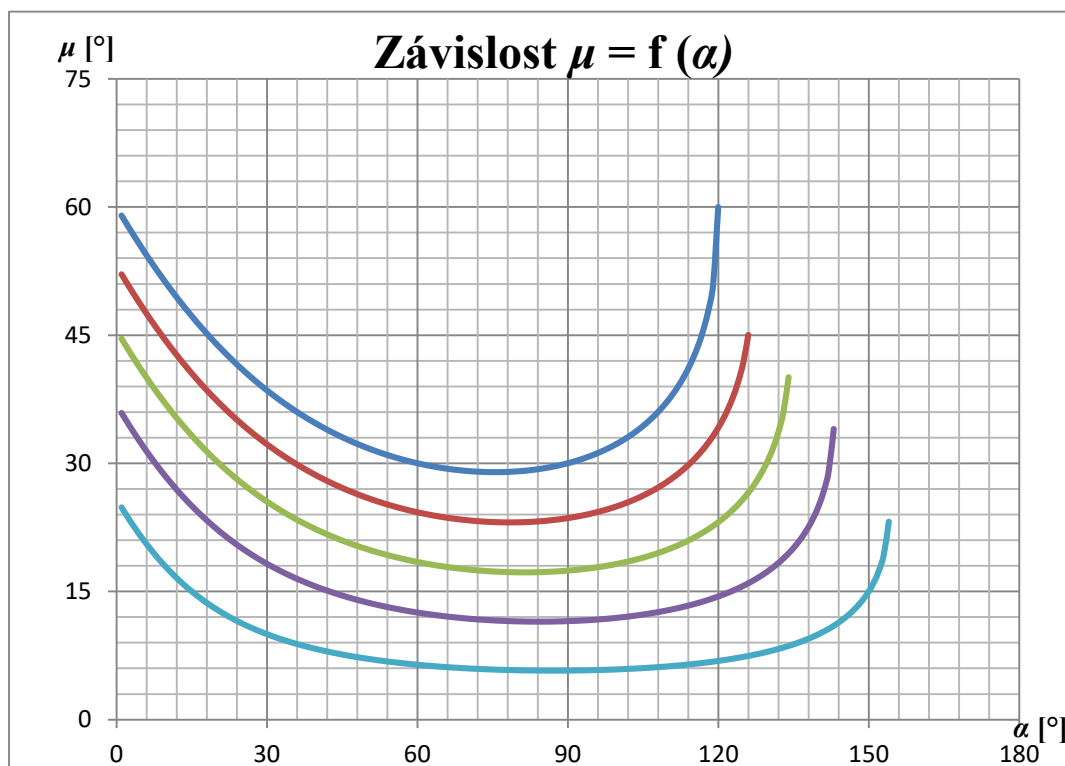
Komutační úhel lze vypočíst ze vztahu:

$$\mu = \arccos \left(\cos(\alpha) - \frac{2 \cdot \omega \cdot L_k \cdot I_d}{U_{km}} \right) - \alpha \quad (1.8)$$

, kde U_{km} je amplituda sousedních komutujících fází a lze ji vypočíst pomocí vztahu 1.9. [1]

$$U_{km} = 2 \cdot U_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \quad (1.9)$$

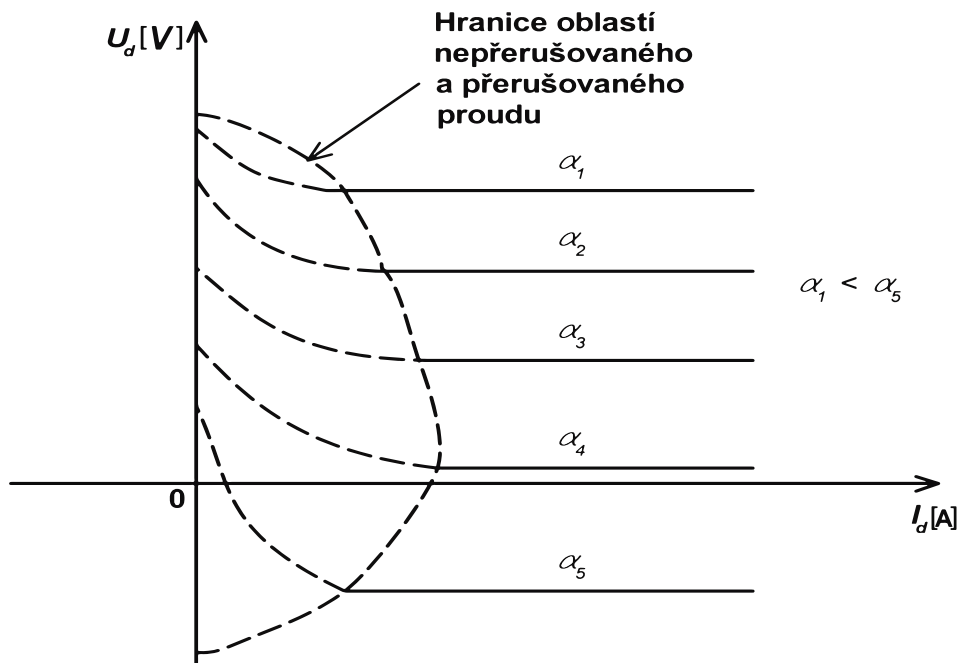
Ze vztahu 1.8 lze určit, že zvyšováním řídicího úhlu α dochází k poklesu komutačního úhlu μ . Komutační úhel bude klesat až do řídicího úhlu $\alpha = 90^\circ$. Nad řídicí úhel $\alpha > 90^\circ$ se bude komutační úhel zvyšovat. Závislost komutačního úhlu na řídicím je zobrazena na obrázku 1.7. [4]

Obrázek 1.7: Závislost $\mu = f(\alpha)$

1.3 Zatěžovací charakteristika usměrňovače

Zatěžovací charakteristika je závislost střední hodnoty usměrněného napětí na zatěžovacím proudu. Její parametr je řídicí úhel α . Pokud je řídicí úhel α konstantní, tak zatěžovací proud I_d je závislý pouze na parametrech zátěže. [1]

Zatěžovací charakteristika je rozdělena na dvě oblasti, a to oblast nepřerušovaných proudů a přerušovaných proudů. Ideální zatěžovací charakteristika je zobrazena na obrázku 1.8. Tato charakteristika nepočítá s úbytkem na reaktanci napájecího zdroje, na spínacích součástkách a s úbytkem na činných odporech. Reálná charakteristika je zobrazena na obrázku 1.9. [1]



Obrázek 1.8: Ideální zatěžovací charakteristika [1]

Oblast nepřerušovaných proudů – V oblasti nepřerušovaných proudů je ideálně U_d konstantní pro daný úhel α . Nedochází tedy k jeho poklesu v závislosti na I_d . [1]

Oblast přerušovaných proudů – V oblasti přerušovaných proudů je i při daném úhlu α usměrněné napětí U_d proměnné, jak lze vidět na obrázku 1.8. [1]

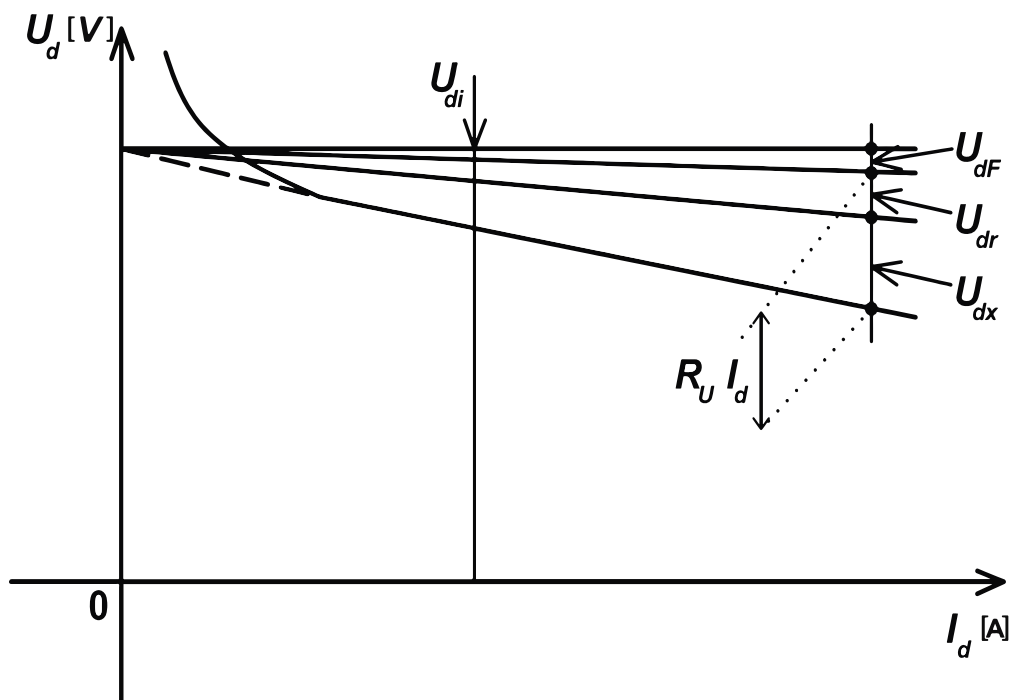
Pokud bude respektována reaktance zdroje, tak usměrněné napětí U_d nebude v závislosti na I_d konstantní a jeho hodnota bude menší než v ideálním případě, jak je vidět na obrázku 1.9. K tomuto úbytku napětí dochází při komutaci, kdy přechází proud z jedné větve na druhou. Tímto přechodem vzniká úbytek na reaktanci napájecího zdroje. [1,2] Tento úbytek je vyjádřen vztahem:

$$U_{dx} = \frac{p\omega Q_{Lk}}{2\pi} \quad (1.5)$$

, kde Q_{Lk} je napěťové množství, které je dodané komutační indukčnosti větve přebírající proud zátěže. Toto napěťové množství je dáno vztahem 1.6. [1]

$$Q_{Lk} = L_k \cdot I_d \quad (1.6)$$

Jak již bylo uvedeno, tak dochází k úbytku napětí nejen na reaktanci napájecího zdroje U_{dx} , ale také k úbytku napětí na činných odporech usměrňovače U_{dr} , který je asi pětina úbytku napětí na reaktanci napájecího zdroje, a úbytku na polovodičových součástkách U_{dF} . Jednotlivé úbytky jsou vidět na obrázku 1.9. [1]



Obrázek 1.9: Reálná zatěžovací charakteristika [1]

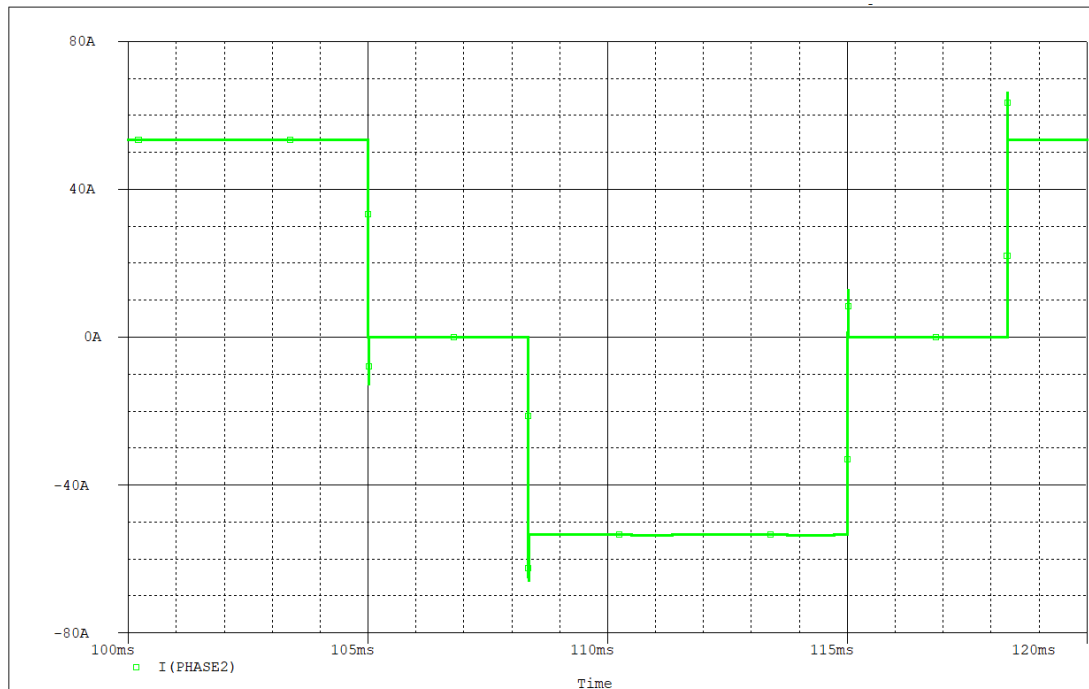
Součtem úbytku na činných odporech U_{dr} a úbytku na reaktanci napájecího zdroje U_{dx} je dán úbytek napětí na ekvivalentním odporu usměrňovače R_U . Tím lze vyjádřit vztah 1.7. [1]

$$U_{dr} + U_{dx} = R_U \cdot I_d \quad (1.7)$$

Pokud dojde k přerušovaným proudům, tak nevznikají uvedené úbytky na reaktanci napájecího zdroje. Protože při přerušovaném proudu nedochází ke komutaci. [1]

1.4 Zpětné vlivy usměrňovačů

Šestipulzní řízený usměrňovač odebírá ze sítě nesinusový proud tento proud je zobrazen na obrázku 1.10. Předpokladem pro zobrazený průběh síťového proudu na obrázku 1.10 je ideálně vyhlazený proud zátěží. První harmonická odebíraného proudu je navíc vlivem fázového řízení fázově posunutá k síťovému napětí. Tento fázový posun je označován φ_1 . [1,3,4] Účinník usměrňovače je obecně určen vztahem:



Obrázek 1.10: Průběh fázového proudu šestipulzního usměrňovače

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S_1} \quad (1.8)$$

, kde P je činný výkon a S_1 je zdánlivý výkon. Pro činný výkon platí vztah 1.10 a jeho hodnota je určena pouze 1. harmonickou proudu, protože ostatní harmonické proudy nemají svá harmonická napětí. Zdánlivý výkon lze určit vztahem 1.9. [1,3,4]

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.9)$$

Činná složka P zdánlivého výkonu se určí vztahem 1.10 a jalová složka Q vztahem 1.11. [3]

$$P = S_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (1.10)$$

$$Q = S_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (1.11)$$

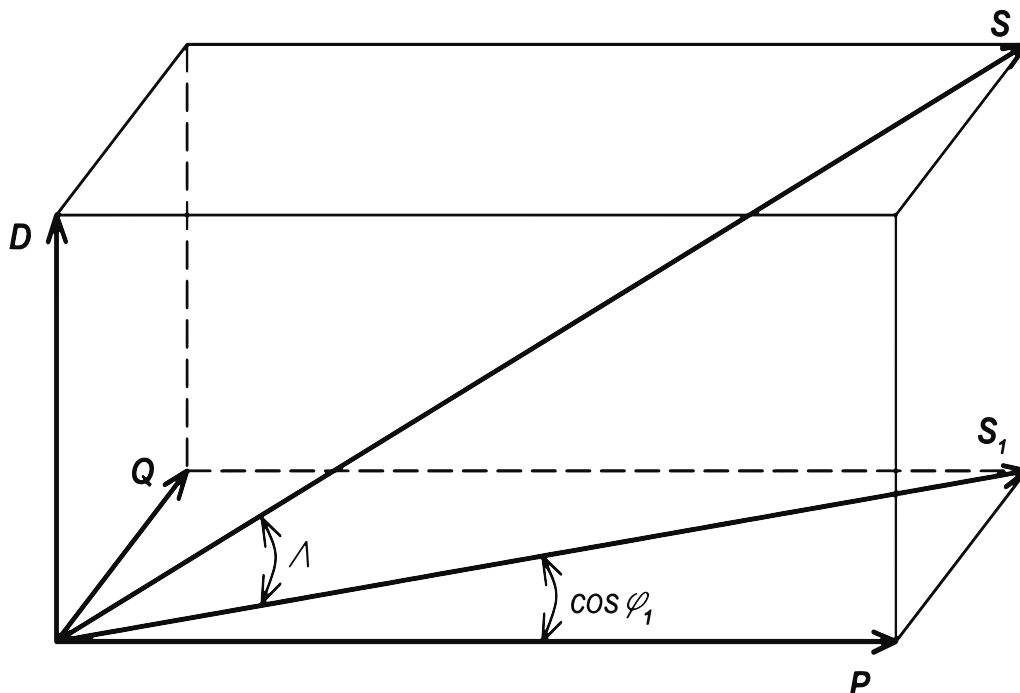
Pokud je ale odebíraný proud nesinusový, tak dochází k nerovnosti zdánlivého výkonu S se součtem činné a jalové složky výkonu. Tím se zavede deformační výkon, který se vypočte vztahem 1.12. [4]

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (1.12)$$

Deformační výkon stejně jako jalová složka zdánlivého výkonu nevykonává žádnou práci. Tento výkon pouze vyvolává nárůst ztrát v napájecí síti a snižuje využitelnost sítě a měniče. Dále nelze používat pouze účinník $\cos \varphi_1$, ale je zaveden skutečný účinník, který je také nazýván faktor výkonu. Skutečný účinník se vypočte pomocí vztahu 1.13. [4]

$$\Lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.13)$$

Na obrázku 1.11 je zobrazen diagram jednotlivých výkonů.



Obrázek 1.11: Diagram složek výkonů [4]

1.4.1 Kmitočtové spektrum napájecího fázového proudu ŘU

Řízený usměrňovač je nelineární zátěží. Kvůli tomu obsahuje napájecí fázový proud kromě základní harmonické taky složky vyšších harmonických. Kmitočtové spektrum napájecího fázového proudu řídicího usměrňovače závisí na vlastnostech napájecí sítě, zapojení usměrňovače, zapojení napájecího transformátoru a vlastnostech zátěže. Pomocí vztahu 1.13 lze určit charakteristické harmonické usměrňovače. V praxi se ale objevují i necharakteristické harmonické, které jsou způsobeny amplitudovou nesymetrií napájecí soustavy, fázovou nesymetrií napájecí soustavy a nesymetrií řízení měniče. [1,4,6]

$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (1.13)$$

Ve vztahu 1.13 je k celé číslo a p je pulznost usměrňovače. [6]

Dále lze napsat vztah 1.14 pro určení amplitudy n -té harmonické, který je nazýván jako amplitudový zákon:

$$I_n = \frac{1}{n} \cdot I_1 \quad (1.14)$$

, kde I_1 je amplituda první harmonické síťového proudu a pro šestipulzní usměrňovač ji lze vypočítat pomocí vztahu 1.15. [4]

$$I_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d \quad (1.15)$$

Na spektrum vyšších harmonických nemá vliv komutační úhel μ ani řídicí úhel α . Vlivem komutace, ale dochází ke snížení amplitud vyšších harmonických. Amplitudy vyšších harmonických lze poté určit pomocí vztahů 1.16 a 1.17. [4,6]

$$I_n = \frac{1}{n} \cdot I_1 \cdot k_\mu \quad (1.16)$$

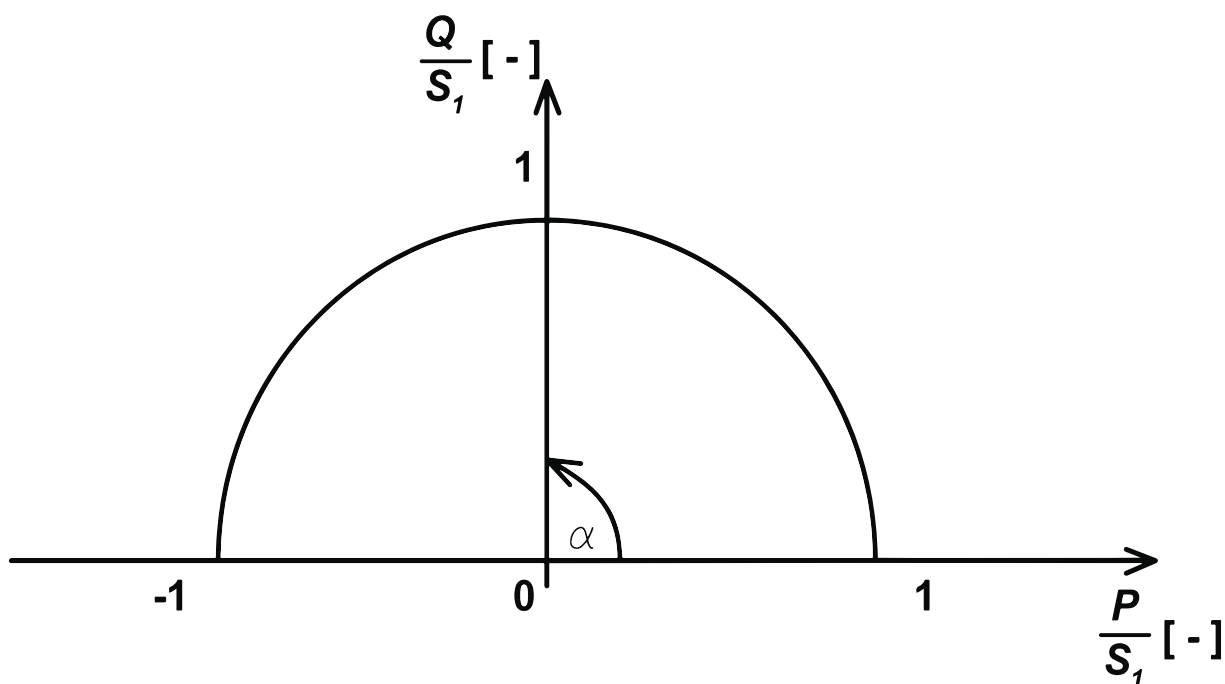
$$k_\mu = \frac{\sin(\frac{n\mu}{2})}{\frac{n\mu}{2}} \quad (1.17)$$

K posouzení obsahu harmonických v celkovém spektru je udáváno harmonické zkreslení THD , které lze vypočítat pomocí vztahu 1.18. [4]

$$THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (1.18)$$

1.4.2 Kruhový diagram

Kruhový diagram zobrazuje vztahy mezi činným výkonem P , jalovým výkonem Q , zdánlivým výkonem S , řídicím úhlem α a fázovým posunem první harmonické proudu od síťového napájecího napětí φ_1 . Tyto vztahy jsou vyjádřeny s předpokladem ideálně vyhlazeného usměrněného proudu. K výpočtu kruhového diagramu jsou použity vztahy 1.10 a 1.11. Kruhový diagram se dále dělí na část pro usměrňovací chod (I. kvadrant) a na střídačový chod (II. kvadrant). Na obrázku 1. 12. je tento diagram zobrazen. [1,5,6]

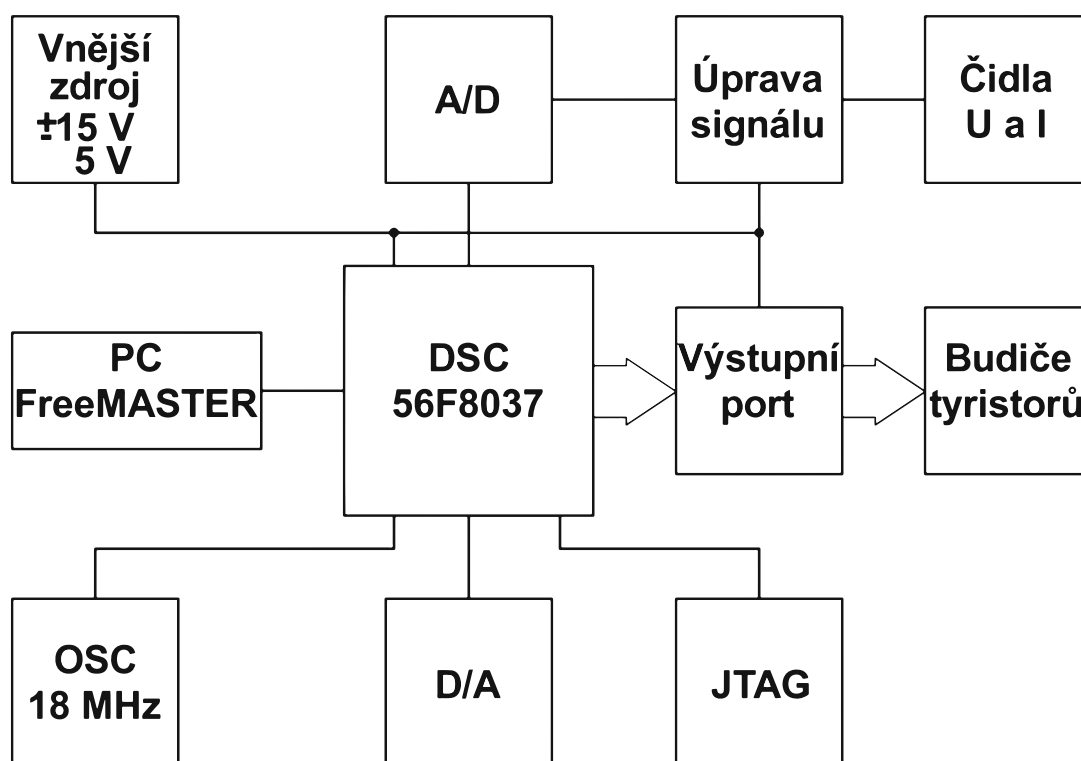


Obrázek 1.12: Kruhový diagram šestipulzního usměrňovače [6]

Na obrázku 1.12 lze vidět, že nejvíce odebíraný činný výkon P je při úhlu $\alpha = 0^\circ$ a nejvíce dodávaný činný výkon je při řídicím úhlu $\alpha = 180^\circ$. Dále nejméně odebíraný jalový výkon Q při usměrňovacím chodu je při řídicím úhlu $\alpha = 0^\circ$ a je dán komutací. Při střídačovém chodu je nejméně odebíraný jalový výkon dán bezpečnostním úhlem. Naopak při řídicím úhlu $\alpha = 90^\circ$ je jalový výkon odebíráán nejvíce a činný výkon je nulový. [1,6]

2 Řídicí systém řízeného usměrňovače

Jádrem řídicího systému je digitální signálový kontrolér 56F8037 od firmy Freescale. Tento řídicí systém obsahuje obvody pro úpravu signálu z čidel napětí a proudů, výstupní port k připojení desce budičů tyristorů, JTAG konektor, osmikanálový A/D převodník a dvoukanálový D/A převodník. Je také doplněn vnějším oscilátorem o frekvenci 18 MHz a umožňuje komunikaci s PC pomocí programu Freemaster. Řídicí systém je napájen vnějším zdrojem $\pm 15\text{ V}$ a 5 V . V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé části tohoto řídicího systému, jehož blokové schéma je zobrazeno na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Blokové schéma řídicího systému řízeného usměrňovače

2.1 DSC 56F8037

Tento 16bitový digitální kontrolér je členem rodiny digitálních kontrolérů založených na jádru 56800E. Na jednom čipu kombinuje výpočetní výkon digitálního signálového procesoru a funkce mikrokontroléru s flexibilní sadou periférií. Obsahuje velkou sadu periférií, které jsou převážně užitečné pro průmyslové řízení, kontrolu pohybu, domácí spotřebiče, univerzální měniče, inteligentní snímače, požární a bezpečnostní systémy a pro monitorovací lékařské aplikace. [7]

Vlastnosti jádra 56800E:

- duální Harvardská architektura
- 16 x 16 paralelní MAC v jednom cyklu
- čtyři 36bitové akumulátory
- 32bitová aritmetika
- paralelní instrukční sada
- tři interní adresové sběrnice
- čtyři interní datové sběrnice
- sadu instrukcí podporuje DSP i DSC

Paměť DSC 56F8037:

- duální Harvardská architektura umožňující až tři přístupy do programové a datové paměti
- ochrana proti neautorizovanému přístupu do interní flash paměti
- 64kB programová paměť flash
- 8kB sjednocená datová a programová paměť
- emulace EEPROM pomocí flash

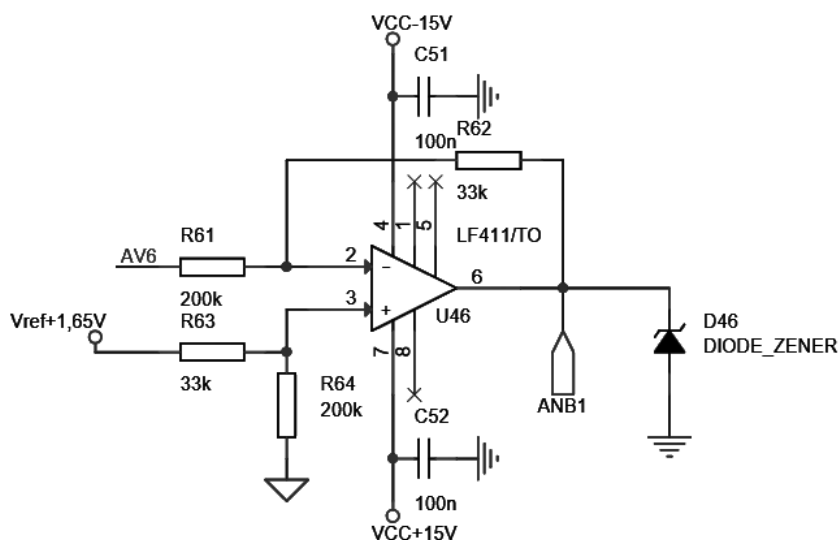
Periferie DSC 56F8037:

- dva nezávislé 12bitové analogově digitální převodníky
 - 2 x 8 kanálový vstup
 - podpora společného a sekvenčního převodu
 - vzorkovací frekvence až 2.67 MSPS
 - výsledkový buffer o velikosti šestnácti slov
- dva 12bitové digitálně analogové převodníky
- tři 16bitové programovatelné časovače
- až 53 GPIO pinů s 5V tolerancí
- dvě sériové komunikační rozhraní QSCI s funkcí LIN Slave
- dvě sériové periferní rozhraní QSPI
- JTAG/EOnCE k ladění programu v reálném čase

2.2 Měření napětí a proudů

V řízeném usměrňovači jsou umístěny čtyři napěťová čidla LV 25-P a čtyři proudová čidla LAH 25-NP od firmy LEM. Tři čidla napětí slouží k měření sdružených napájecích napětí a jedno k měření usměrněného napětí. Dále jsou tři proudová čidla zapojena k měření odebíraného fázového proudu ze sítě a jedno k měření proudu zátěže. V přílohách jsou schémata zapojení těchto čidel i příslušné desky plošných spojů.

Všechna čidla jsou připojena na analogové vstupy řídicího systému. Čidla mají proudový výstup, proto jsou v řídicím systému umístěny měřicí rezistory. Průchodem proudu měřicím rezistorem na něm vzniká úbytek napětí, který se dále upravuje na napěťové úrovni A/D převodníku. K úpravě slouží zapojení s operačním zesilovačem zobrazené na obrázku 2.2.



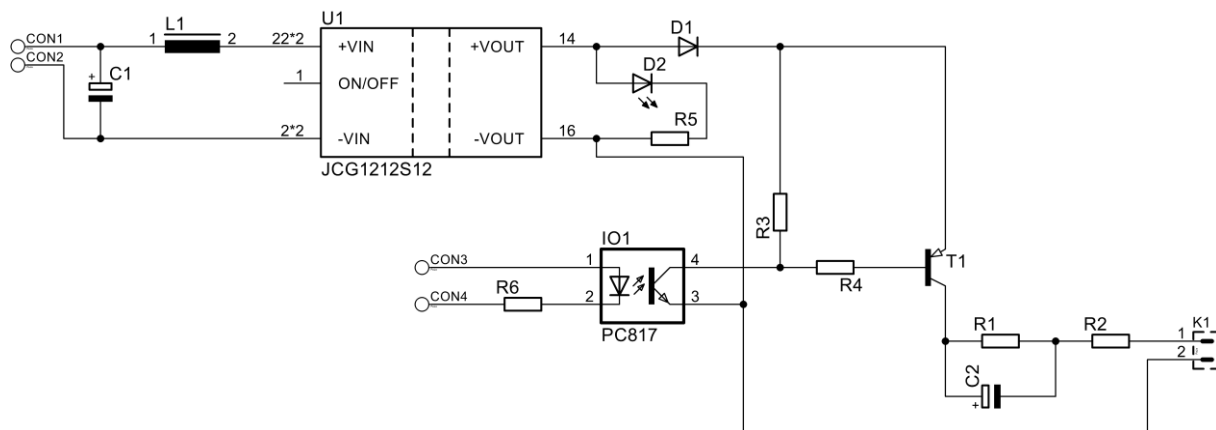
Obrázek 2.2: Schéma zapojení k úpravě napěťových úrovní pro A/D převodník [9]

Výstupy operačních zesilovačů jsou poté přivedeny na vstupy A/D převodníku, kterými jsou piny GPIOC0 – GPIOC7.

2.3 Řízení tyristorů

K řízení tyristorů jsou využívány výstupní piny GPIOA0 – GPIOA5. Piny lze zatížit pouze proudem 2 mA, proto je na řídicím systému umístěn buffer 74LS07. Buffer je schopen dodat na každém výstupu proud maximálně 40 mA. [10]

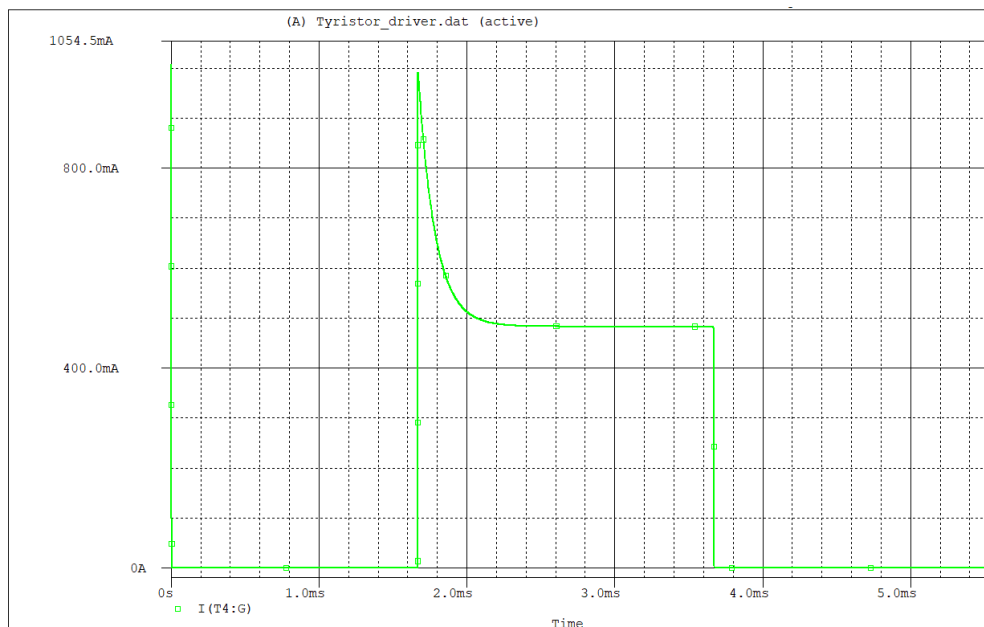
Posílený výstup je připojen na optočlen PC817, který slouží jako galvanické oddělení výkonové a řídicí části. Na obrázku 2.3 je schéma zapojení budiče tyristoru.



Obrázek 2.3: Schéma zapojení budiče tyristoru

Budič tyristoru se skládá se zmíněného optočlenu PC817, PNP tranzistoru BCP53_C a izolovaného DC-DC zdroje JCG1212S12, který slouží k oddělení napájecího zdroje od výkonové části. Dále je popsána jeho funkce.

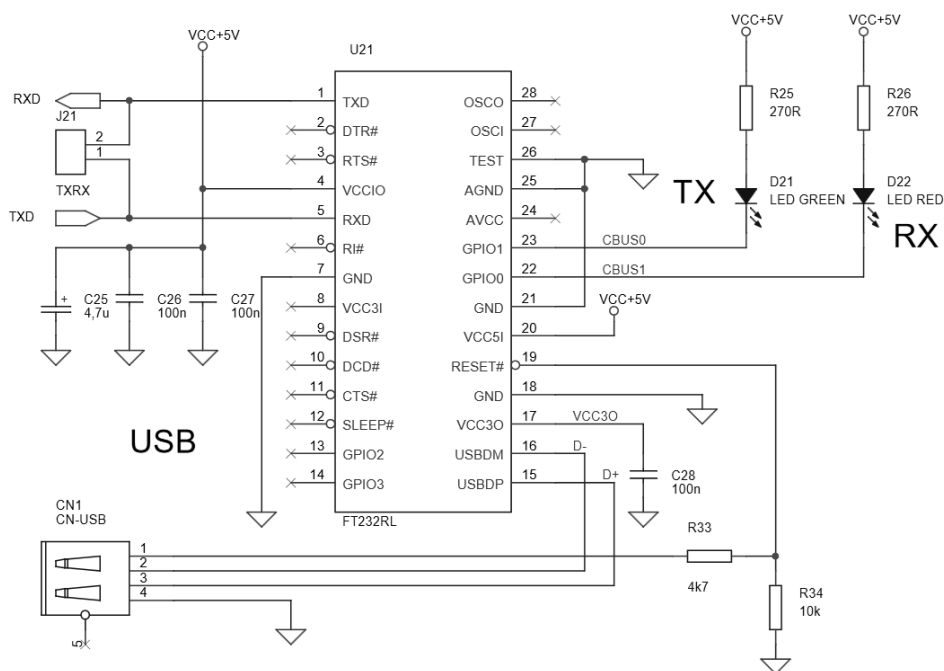
Přivedením signálu na optočlen dojde k jeho sepnutí, tím se uzemní báze tranzistoru T1 a začne protékat proud do hradla tyristoru. Proud bude nejdříve protékat přes kondenzátor C2, který přemostí rezistor R1, čímž bude protékat do hradla větší proud. Nabitím kondenzátoru se proud sníží. Tímto způsobem se vytvoří proudová špička, která zrychlí sepnutí tyristoru. Průběh proudu je zobrazen na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Průběh proudu I_G

2.4 Komunikace s PC

Řídicí systém komunikuje s PC pomocí sériové linky QSCI. Ke komunikaci se využívá převodník FT232RL USB UART. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 2.5. Převodník umožňuje komunikovat rychlostí 186 Bd až 3 MBd. V tomto případě je nastavena komunikace na 115200 Bd. [11]

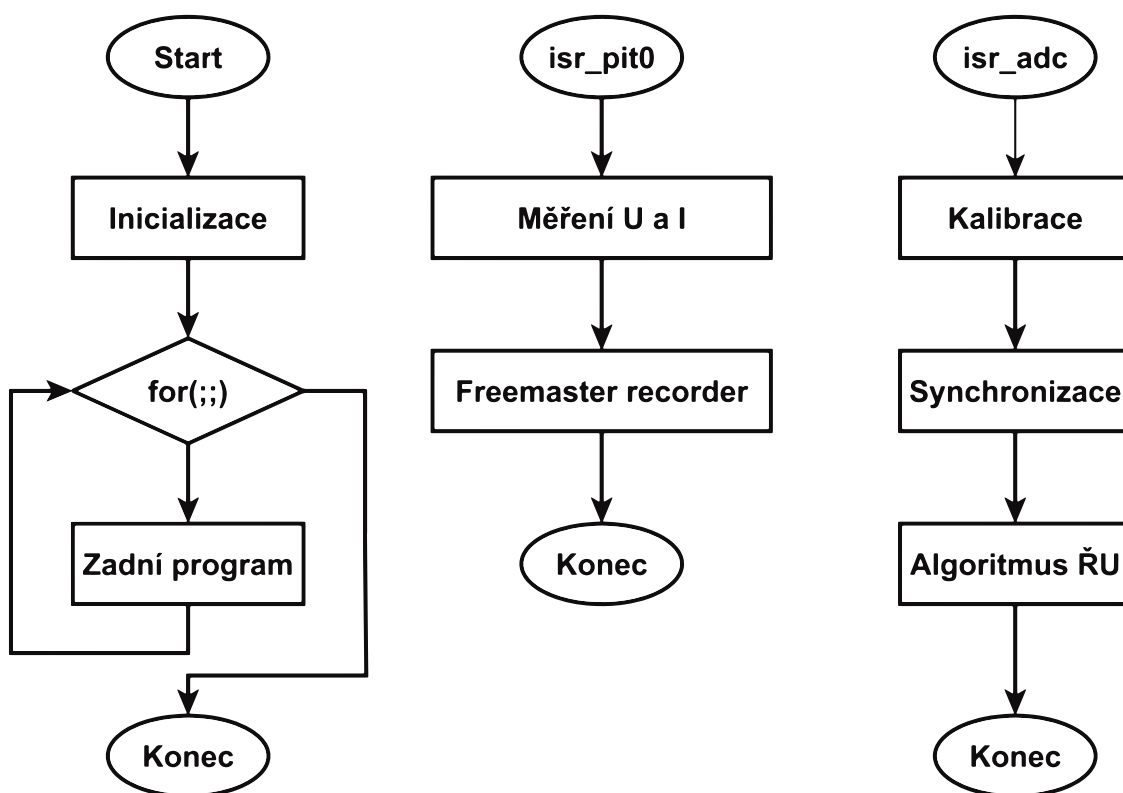


Obrázek 2.5: Zapojení převodníku FT232RL [9]

3 Programové vybavení řídicího systému

V této kapitole bude popsáno programové vybavení řídicího systému a ovládací software pro PC. Software řídicího systému je sepsán ve vývojovém prostředí Codewarrior od firmy Freescale. Je také využíváno komponentů z Processor Expert, které ulehčují psaní programu. Jako ovládací software pro PC je použit program Freemaster od firmy Freescale.

Program řídicího systému se skládá z několika částí, kterými jsou inicializace, nekonečná smyčka, přerušení *isr_pit0* a přerušení *isr_adc*. Na obrázku 3.1 je zobrazen zjednodušený vývojový diagram řídicího systému řízeného usměrňovače. V následujících podkapitolách budou jednotlivé části vývojového diagramu popsány podrobněji.



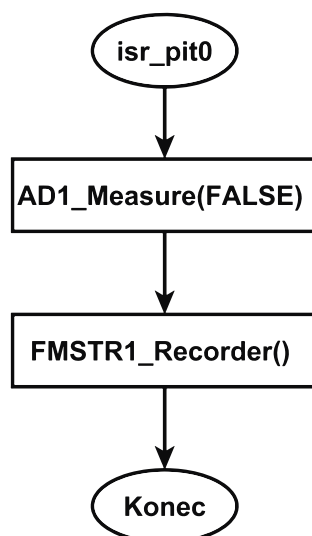
Obrázek 3.1: Zjednodušený vývojový diagram řídicího systému řízeného usměrňovače

3.1 Inicializace a zadní program

Program začíná inicializací, ve které jsou deklarovány jednotlivé proměnné, ukazatele, pole, funkce a konstanty potřebné k běhu programu. V inicializaci se také zapíná časovač *T11* pomocí funkce *T11_EnableEvent*, která je obsažena v komponentě *TimerInt*. V inspektoru komponenty *TimerInt* je nastaven zdroj přerušení *PIT0_Modulo* a perioda přerušení. Po inicializaci se program dostává do zadního programu, kde je umístěna funkce *FMSTR1_Poll*, která umožňuje komunikaci s programem Freemaster přes sériové komunikační rozhraní.

3.2 Přerušení `isr_pit0`

Přerušení `isr_pit0` nastává každých 55 μs . V přerušení je umístěna funkce `AD1_Measure(FALSE)`, která vykonává jedno měření ve všech nastavených kanálech A/D převodníku. Funkce má parametr, který rozhoduje, zda se bude vyčkávat na výsledek měření. Počet jednotlivých kanálů a vstupní piny A/D převodníku je nutné nastavit v inspektoru komponenty `ADC`. Přerušení `isr_pit0` dále obsahuje funkci `FMSTR1_Recorder`, která slouží k vzorkování proměnných do bufferu pro program `Freemaster`. Stejně jako u A/D převodníku je tuto funkci nutné nastavit v inspektoru komponenty `FreeMaster`. V inspektoru se nastavuje velikost bufferu, v tomto případě je nastavena na 2048, a časová základna recorderu. Nastavení časové základny recorderu informuje `Freemaster`, jak často je volána vzorkovací rutina recorderu. `Freemaster` tuto informaci využívá k vykreslení osy x. Na obrázku 3.2 je zobrazen vývojový diagram přerušení `pit0`.



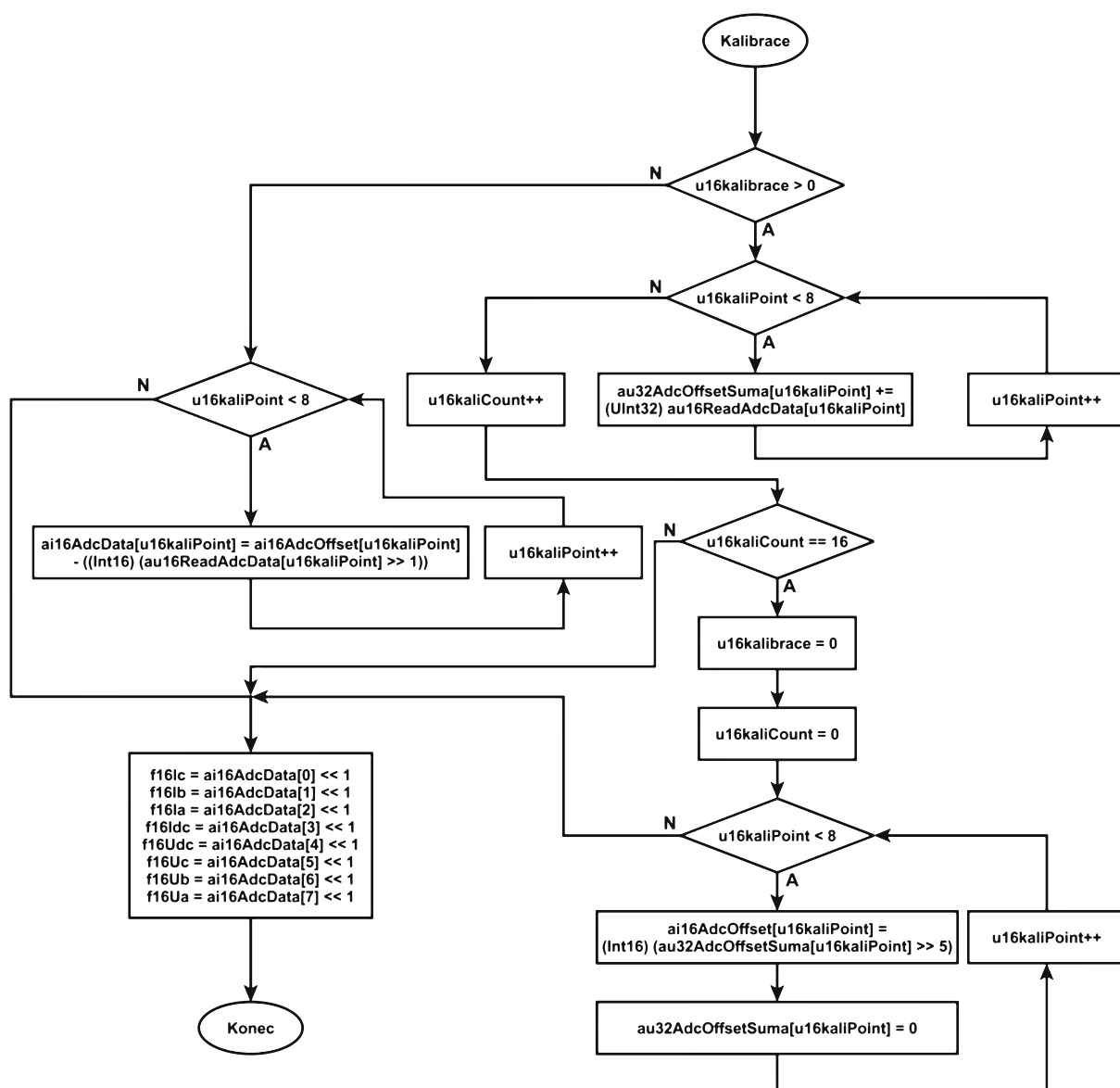
Obrázek 3.2: Vývojový diagram přerušení `pit0`

3.3 Přerušení `isr_adc`

Přerušení `isr_adc` se začne vykonávat po skončení měření A/D převodníku, které začíná v přerušení `isr_pit0`. V `isr_adc` se provádí kalibrace, která slouží k odstranění offsetů na výstupu operačních zesilovačů, synchronizace jednotlivých pilovitých průběhů se sdruženými napětími a nastavení typu řízeného usměrňovače s odpovídajícím algoritmem pro vysílání pulzů na jednotlivé tyristory řízeného usměrňovače. V následujících podkapitolách budou jednotlivé části tohoto přerušení i příslušné vývojové diagramy popsány podrobněji.

3.3.1 Kalibrace

Kalibrace slouží k odstranění offsetů na výstupu operačních zesilovačů, které upravují napěťové úrovně pro A/D převodník. Kalibrace se provede vždy po spuštění řídicího systému. Následně je možné kalibraci opakovat pomocí ovládacího softwaru na PC. Při kalibraci je nutné mít odpojený pojistkový odpojovač, aby se kalibroval pouze offset operačních zesilovačů. Na obrázku 3.3 je vývojový diagram kalibrace.



Obrázek 3.3: Vývojový diagram kalibrace

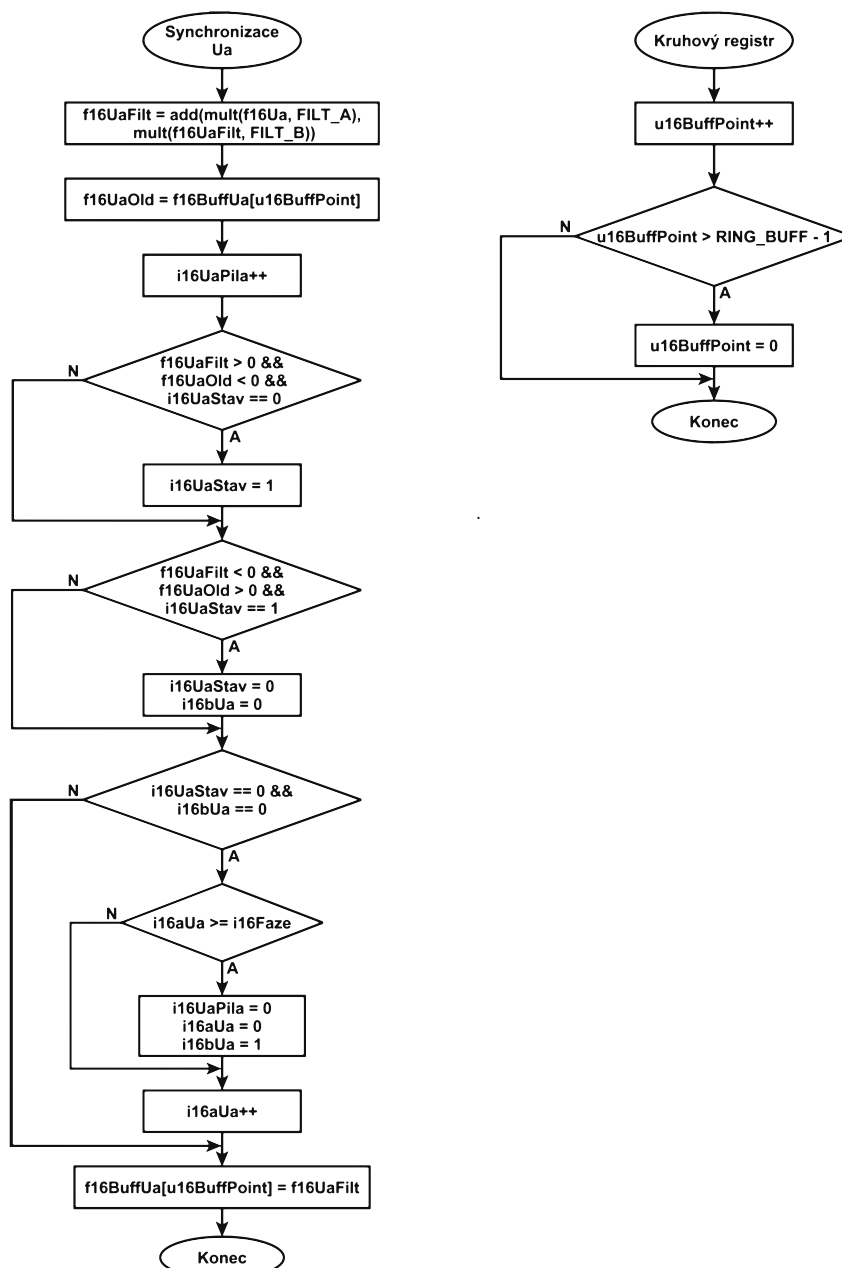
Dříve než dojde ke kalibraci, volá se funkce *ADI_GetValue16(au16ReadAdcData)*, která vrací poslední změřené hodnoty ze všech kanálů A/D převodníku. Tyto hodnoty jsou uloženy do pole *au16ReadAdcData* jako 16bitová čísla.

Kalibrace nastane, je-li splněná podmínka $u16kalibrace > 0$. Následně probíhá smyčka *for*, která slouží k přičtení změřených offsetů operačních zesilovačů jednotlivých kanálů A/D převodníku do pole *au32AdcOffsetSuma*. Po naplnění tohoto pole změřenými offsety je proměnná *u16kaliCount* inkrementována. Proměnná *u16kaliCount* udává, kolikrát proběhlo přičtení změřených offsetů do pole *au32AdcOffsetSuma*. Pokud se $u16kaliCount = 16$, kalibrace se vypíná a tato proměnná se nuluje. Poté probíhá další smyčka *for*, pomocí které je určena průměrná hodnota každého prvku z pole *au32AdcOffsetSuma*. Tyto hodnoty jsou nahrány do pole *ai16AdcOffset* a pole *au32AdcOffsetSuma* je nulováno. Každý prvek pole *ai16AdcOffset* tímto obsahuje průměr změřených offsetů operačních

zesilovačů. Vypnutím kalibrace přestane platit podmínka $u16kalibrace > 0$. Tím se dostane program do další smyčky *for*, ve které jsou od průměrných offsetů každého kanálu odečítány změřené hodnoty proudů a napětí, a tak je odstraněn offset operačních zesilovačů. Následně jsou jednotlivé prvky pole *ai16AdcData* nahrány do odpovídajících proměnných.

3.3.2 Synchronizace

Synchronizace slouží k synchronizaci pilového průběhu s měřeným sdruženým napětím. Cílem je tedy zachytit průchod sdruženého napětí nulou a od této chvíle začít inkrementovat pilovitý průběh. Na obrázku 3.4 je zobrazen vývojový diagram synchronizace sdruženého napětí U_a . Stejným způsobem probíhá synchronizace pro všechna sdružená napětí.



Obrázek 3.4: Vývojový diagram synchronizace a kruhového registru

Začátkem synchronizace je nutné měřená napětí vyfiltrovat, aby se omezilo rušení a tím kmitání kolem průchodu nulou. K filtraci je použita dolní propust, jejíž výstupní napětí je popsáno vztahem 3.1:

$$U_{OUT(n+1)} = A_{dp} \cdot U_{IN(n+1)} + B_{dp} \cdot U_{OUT(n)} \quad (3.1)$$

, kde $U_{IN(n+1)}$ je hodnota na vstupu filtru, $U_{OUT(n)}$ je hodnota výstupního napětí filtru vypočtená v předchozím výpočtu a A_{dp} a B_{dp} jsou konstanty filtru. Tyto konstanty se vypočtou pomocí vztahů 3.2 a 3.3:

$$A_{dp} = \frac{T_{vz}}{T_{vz} + \tau_{dp}} \quad (3.2)$$

$$B_{dp} = \frac{\tau_{dp}}{T_{vz} + \tau_{dp}} \quad (3.3)$$

, kde T_{vz} je vzorkovací perioda, τ_{dp} je časová konstanta filtru a f_{dp} je mezní lomová frekvence. Časová konstanta se vypočte pomocí vztahu 3.4.

$$\tau_{dp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{dp}} \quad (3.4)$$

V tomto případě je vzorkovací perioda filtru $T_{vz} = 55 \text{ us}$ a zvolená mezní lomová frekvence $f_{dp} = 100 \text{ Hz}$. Dosazením těchto hodnot do vztahů 3.2, 3.3 a 3.4 bude platit.

$$\tau_{dp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{dp}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100} = 1,59155 \text{ ms} \quad (3.5)$$

$$A_{dp} = \frac{T_{vz}}{T_{vz} + \tau_{dp}} = \frac{55 \cdot 10^{-6}}{55 \cdot 10^{-6} + 1,59155 \cdot 10^{-3}} = 0,033403 \quad (3.6)$$

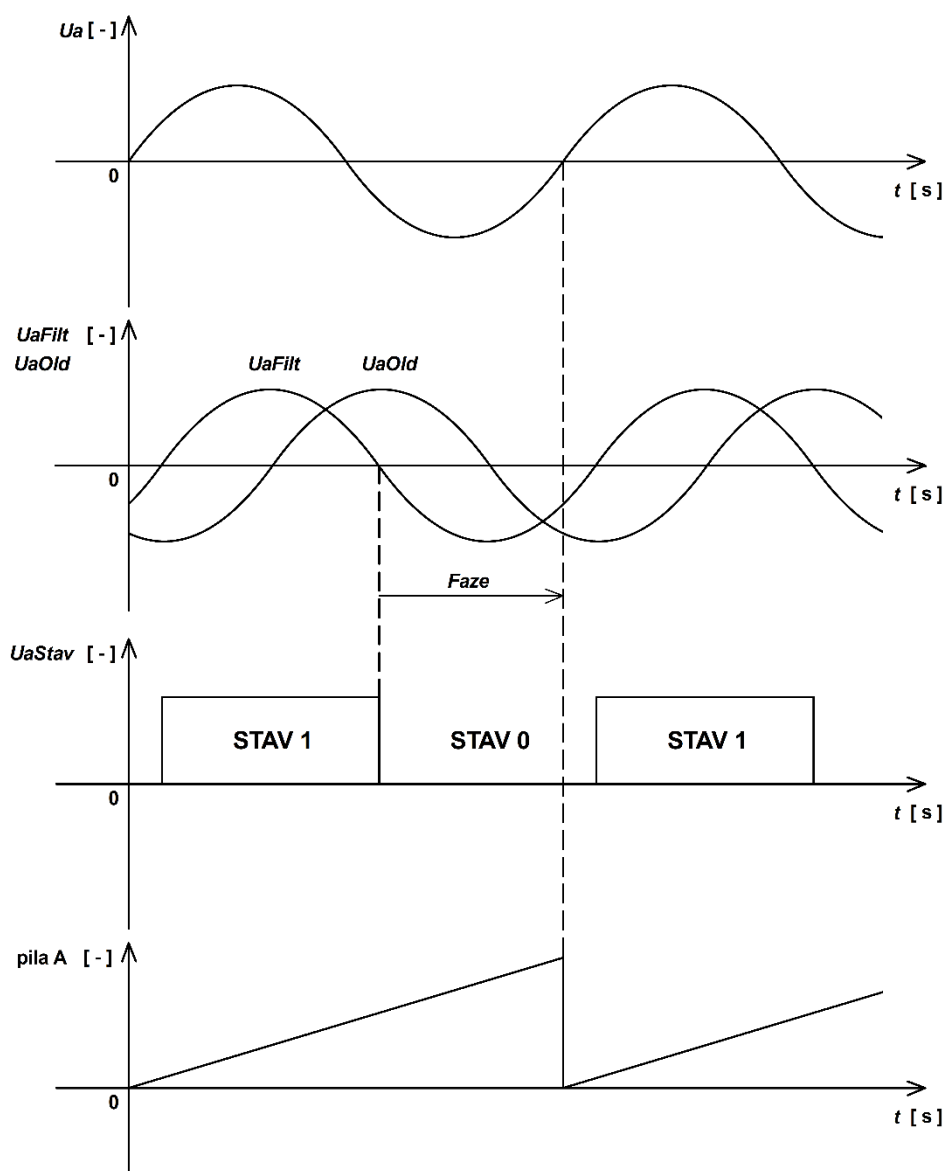
$$B_{dp} = \frac{\tau_{dp}}{T_{vz} + \tau_{dp}} = \frac{1,59155 \cdot 10^{-3}}{55 \cdot 10^{-6} + 1,59155 \cdot 10^{-3}} = 0,9665968 \quad (3.7)$$

Výpočet vztahu 3.1 se provádí pomocí komponenty *DSP_Func_MFR*, protože DSC56F8037 pracuje s pevnou desetinnou čárkou. K výpočtu je nutné využít datový typ *FRAC16*, se kterým umožňuje matematické operace komponenta *DSP_Func_MFR*. Jako součet se používá funkce *add* a k násobení se využívá funkce *mult*. Vypočtené napětí se ukládá do proměnné *fl6UaFilt*.

Po vyfiltrování sdruženého napětí je do proměnné *fl6UaOld* nahrána hodnota z pole *fl6BuffUa*. Toto pole představuje kruhový registr, v kterém jsou nahrány hodnoty filtrovaného napětí zpožděné o 90°. Dalším krokem je inkrementace pilovitého průběhu, který je uložený v proměnné *il6UaPila*. Průchodem měřeného sdruženého napětí nulou bude tento průběh vynulován.

K určení průchodu měřeného sdruženého napětí nulou se nejprve stanoví průchod nulou filtrovaného napětí. To se určí rozdělením filtrovaného napětí na dva stavy. Postup lze pozorovat na obrázku 3.5. Stavy určují polaritu napětí a také průchod nulou. K vytvoření těchto dvou stavů se využívá hodnota uložená v kruhovém registru, aktuální hodnota filtrovaného napětí a předchozí stav. Hodnoty z kruhového registru v tomto případě slouží k tomu, aby po překlopení do dalšího stavu nedošlo k zpětnému překlopení do stavu předchozího. K překlopení do stavu 1 musí platit, že filtrované napětí je záporné, hodnota z kruhového registru je kladná a předchozí stav je 0. Splněním podmínky je do proměnné *il6UaStav*, která určuje stav, zapsána hodnota 1. K určení druhého stavu se využívá podmínky, kde filtrované napětí musí být kladné, hodnota z kruhového registru záporná a předchozí stav 1. Splněním popsané podmínky je do proměnné *il6UaStav* zapsána hodnota 0.

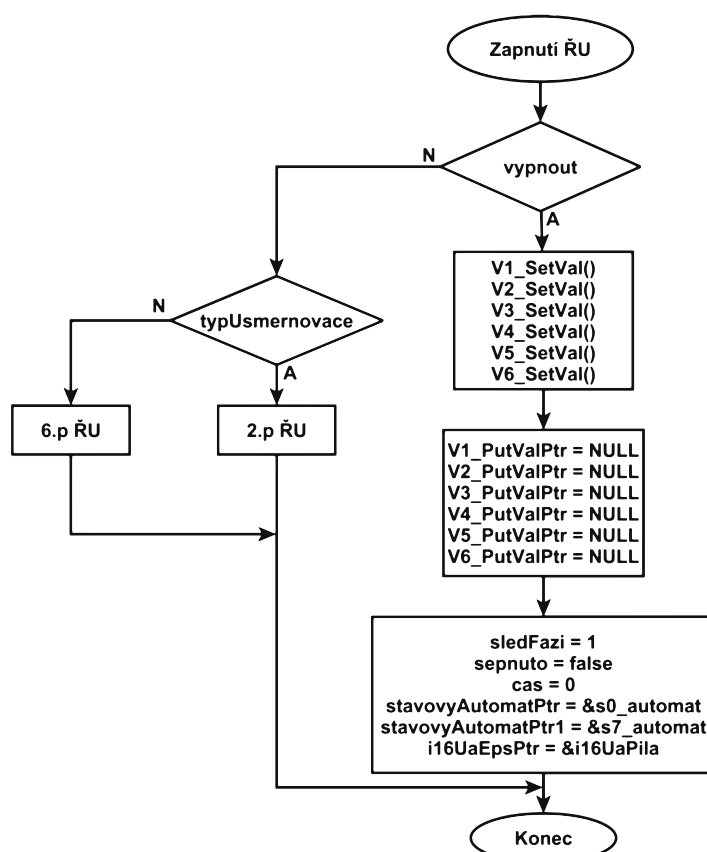
Rozdělením filtrovaného průběhu napětí na dva stavy je možné zachytit průchod nulou. Z důvodu použitého filtru je ale měřené sdružené napětí fázově posunuté. Zachycení průchodu nulou měřeného napětí se docílí tím, že se od překlopení do stavu 0 začne počítat fázový posun. K tomuto se využívá pomocná proměnná $i16aUa$, která se začátkem stavu 0 začíná inkrementovat. Pokud je proměnná rovná proměnné $i16Faze = 155$, tak dojde k vynulování proměnné $i16UaPila$ a pomocných proměnných. Tímto se synchronizuje pilový průběh se sdruženým napětím. Na závěr se do pole $f16BuffUa$ nahraje aktuální hodnota filtrovaného napětí.



Obrázek 3.5: Průběh synchronizace se zobrazením jednotlivých proměnných

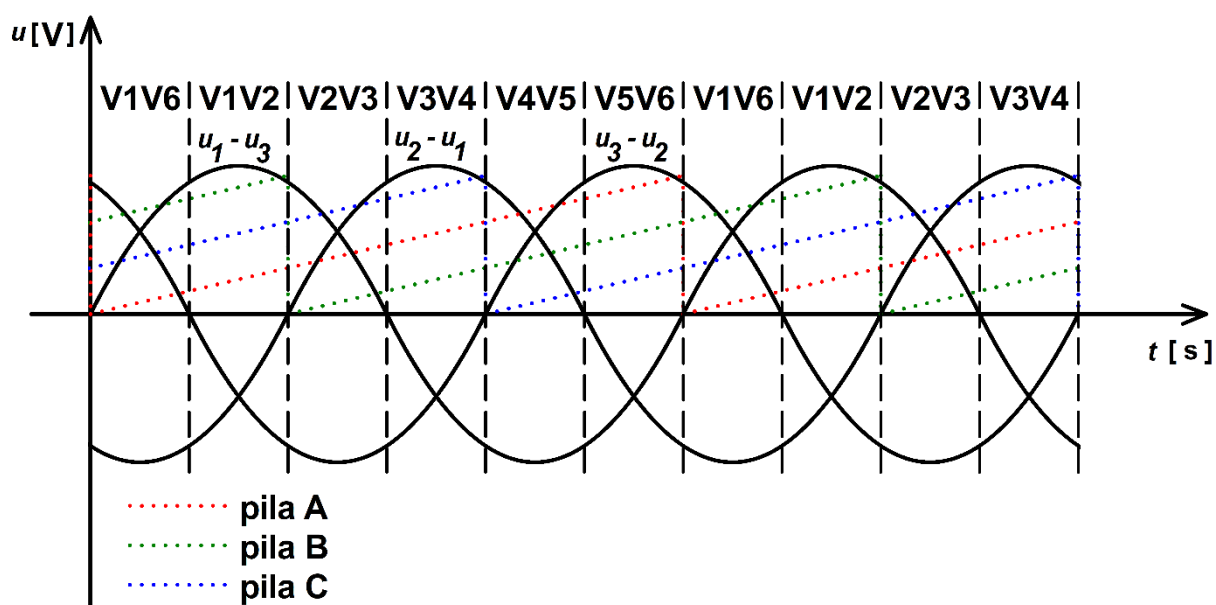
3.3.3 Algoritmus ŘU

Po zapnutí řízeného usměrňovače, nahráním nulové hodnoty do proměnné *vypnout*, se nejprve kontroluje, jaký typ usměrňovače se bude používat. Tato kontrola probíhá v podmínce *if* pomocí proměnné *typUsmernovace*. Pokud je *typUsmernovace* = 1, zvolí se jednofázový můstkový usměrňovač, v opačném případě je volen šestipulzní usměrňovač. Nahráním hodnoty 1 do proměnné *vypnout* dojde k vypnutí řízeného usměrňovače. Při vypnutí jsou nastaveny počáteční podmínky pro jednotlivé usměrňovače a pomocí makra *setVal* z komponenty *BitIO* jsou zablokovány všechny pulzy na tyristory. Vývojový diagram zapínání a volby řízeného usměrňovače je zobrazen na obrázku 3.6.

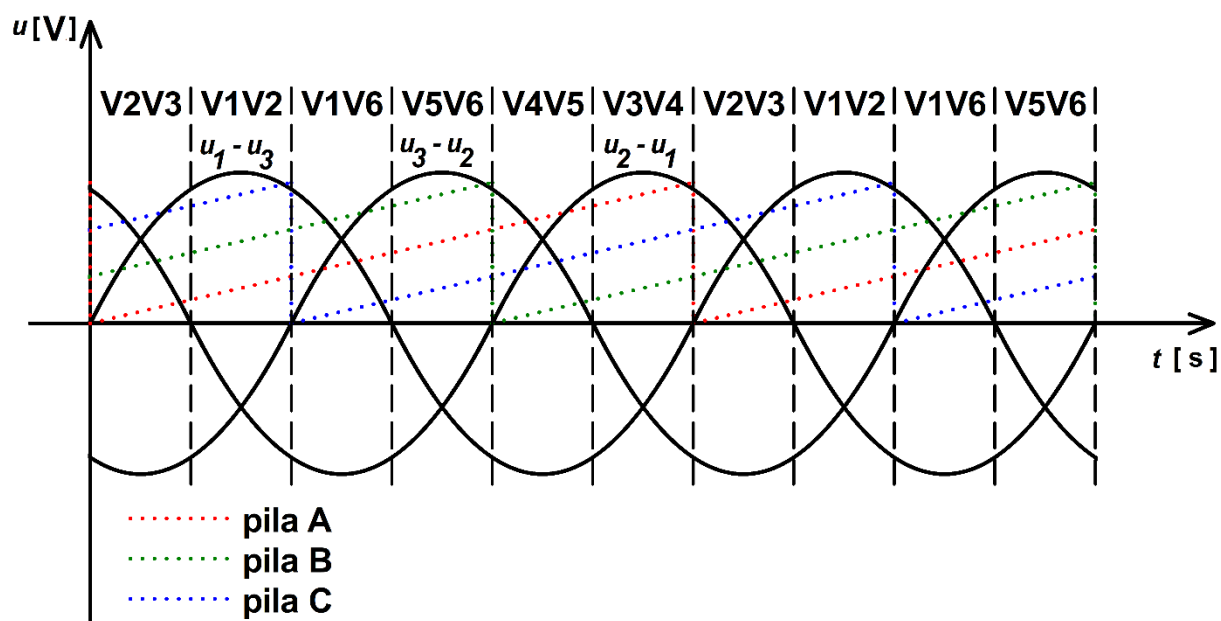


Obrázek 3.6: Vývojový diagram zapínání a volby řízeného usměrňovače

Zvolením šestipulzního řízeného usměrňovače se nejprve kontroluje sled fází. Kvůli zrychlení běhu programu se kontrola provádí pouze jednou. Ke kontrole sledu fází se využívají generované pilové průběhy. Pilové průběhy nabývají hodnot od 0 do 360. Kontrola probíhá tak, že se volí pilový průběh *pila A* jako pevný a další jsou od něj odečítány. Pokud rozdíl *pily A* a *pily B* bude v intervalu $110 \leq \text{rozdíl} \leq 130$ nebo $-250 \leq \text{rozdíl} \leq -230$, tak se bude jednat o sled fází ABC. Tento sled fází je vidět na obrázku 3.7 i s odpovídajícími spínacími kombinacemi. Dojde-li k prohození fází a bude-li platit $-130 \leq \text{rozdíl} \leq -110$ nebo $230 \leq \text{rozdíl} \leq 250$, bude sled fází ACB, který je zobrazen i se spínacími kombinacemi na obrázku 3.8. Nedojde-li k určení sledu fází, řízený usměrňovač se vypne.

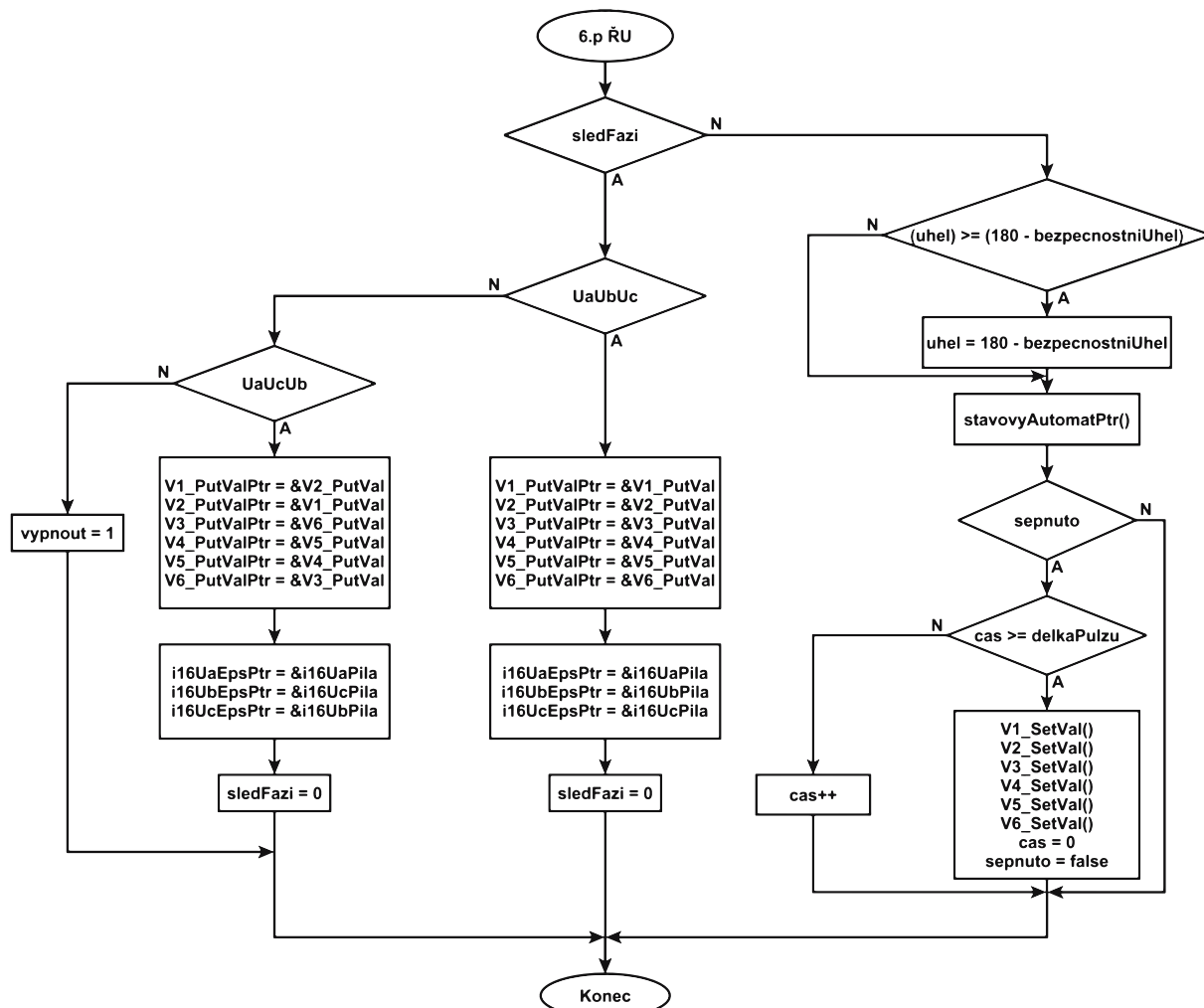


Obrázek 3.7: Sled fází ABC



Obrázek 3.8: Sled fází ACB

Kdyby nedošlo k určení sledu fází, řízený usměrňovač by nemohl fungovat správně z důvodu neodpovídajících spínacích kombinací. Na obrázku 3.9 je zobrazen vývojový diagram pro šestipulzní usměrňovač.

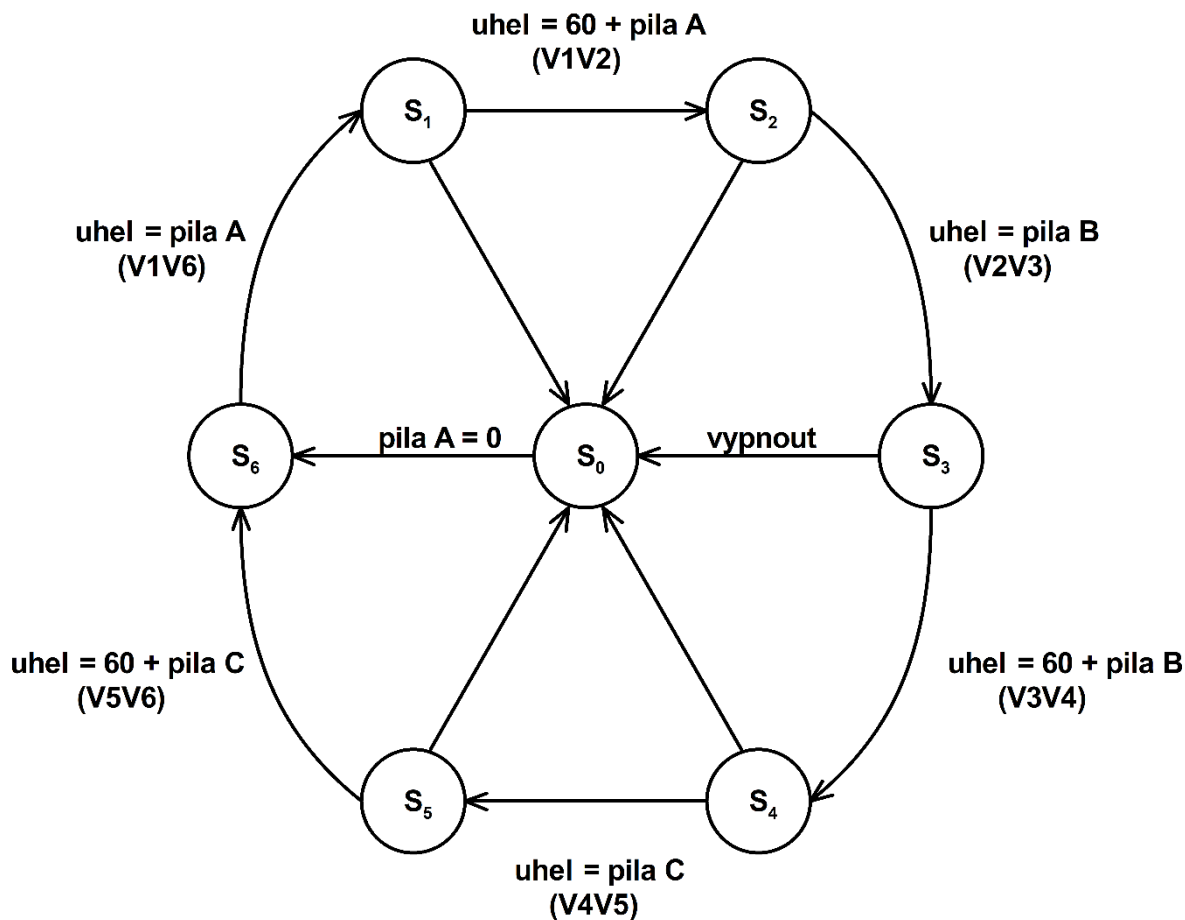


Obrázek 3.9: Vývojový diagram řízeného šestipulzního usměrňovače

Po určení sledu fází jsou nastaveny spínací kombinace řízeného usměrňovače podle obrázků 3.7 a 3.8. K nastavení se využívají ukazatele na funkce. Pro šestipulzní řízený usměrňovač je v inicializaci deklarováno šest ukazatelů. Do těchto ukazatelů jsou poté nahrávány adresy funkcí *PutVal* z komponenty *BitIO*. V komponentě *BitIO* je nutné nastavit výstupní piny, které odpovídají danému tyristoru. Tyto funkce pak slouží k sepnutí odpovídajícího tyristoru. Jak lze vidět na obrázcích 3.7 a 3.8, dochází i k prohození pilových průběhů. Proto jsou v inicializaci deklarovány tři ukazatele pro tyto pilové průběhy. Do těchto ukazatelů jsou nahrávány adresy pilových průběhů, které odpovídají danému sledu fází. Po přiřazení jednotlivých spínacích kombinací je do proměnné *sledFazi* nahrána hodnota nula. Tímto je ukončena kontrola sledu fází.

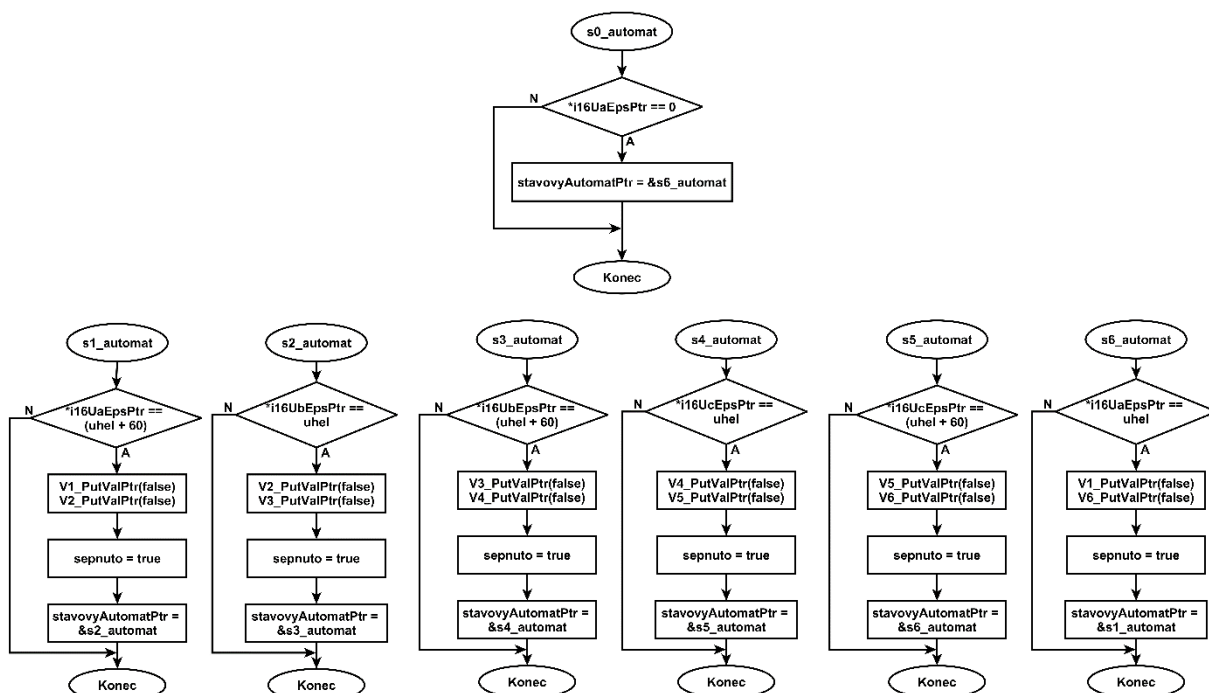
Před vysláním pulzů na jednotlivé tyristory je kontrolován bezpečnostní úhel pomocí výše uvedené podmínky *if* ve vývojovém diagramu na obrázku 3.9. Podmínka je splněna, pokud je proměnná *uhel*, která odpovídá řídicímu úhlu α , větší než úhel daný bezpečnostním úhlem. Bezpečnostní úhel je možné měnit, je uložen v proměnné *bezpecnostniUhel* a nastaven na 30°, což odpovídá maximálnímu řídicímu úhlu 150°. Splněním podmínky je tedy do proměnné *uhel* nahrána maximální hodnota řídicího úhlu.

Po kontrole bezpečnostního úhlu následuje ukazatel na funkci *stavovyAutomatPtr*. Ukazatelem je vytvořen stavový automat, pomocí kterého jsou spínány jednotlivé kombinace tyristorů. Stavový automat na obrázku 3.10 odpovídá spínacím kombinacím uvedených na obrázku 3.7.



Obrázek 3.10: Stavový automat šestipulzního řízeného usměrňovače

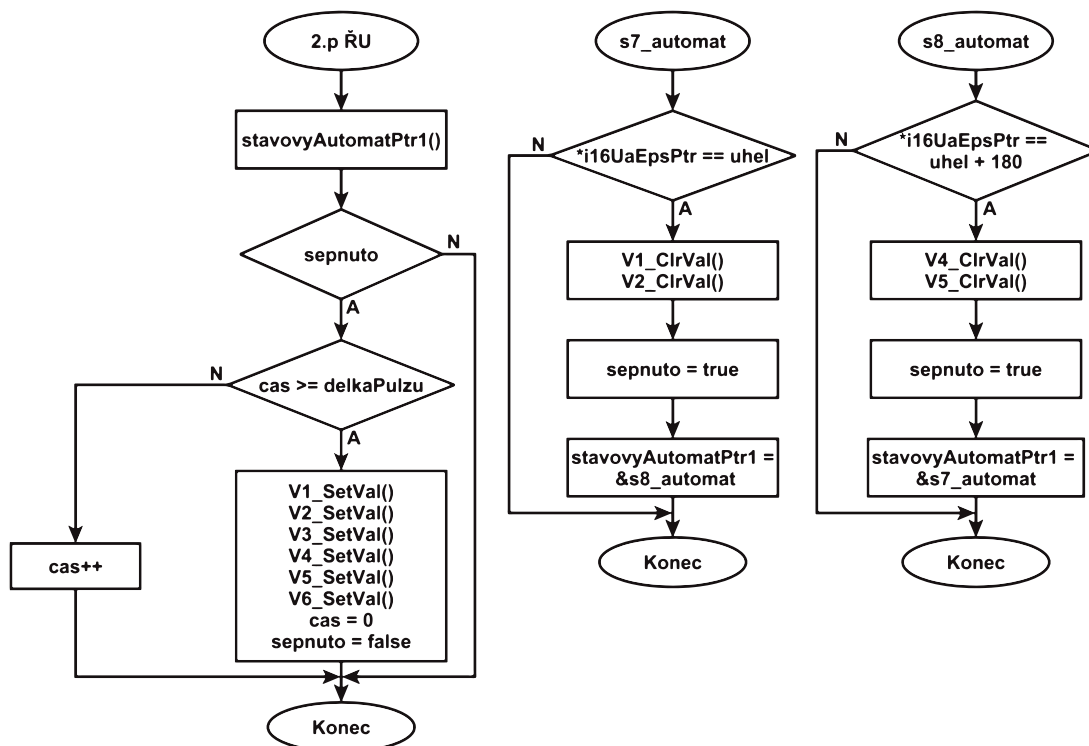
Na začátku se stavový automat nachází ve stavu S_0 . Pokud je *pila A* = 0, dochází k přeskočení do stavu S_6 . Ve stavu S_6 se kontroluje, zda je nastavený úhel roven *pila A*. Bude-li tato podmínka splněna, dojde k přeskočení do dalšího stavu S_1 , kde následuje další podmínka. Takto se bude při plnění podmínek přeskakovat ze stavu na stav a budou spínány dané kombinace tyristorů. Dojde-li k vypnutí řízeného usměrňovače, pak se bude z jakéhokoliv stavu skákat zpět do stavu S_0 . Vývojový diagram tohoto stavového automatu je zobrazen na obrázku 3.11.



Obrázek 3.11: Vývojový diagram stavového automatu šestipulzního usměrňovače

Splněním podmínky v určitém stavu dojde k sepnutí daných tyristorů, do proměnné *sepnuto* je nahrána logická hodnota *true* a do ukazatele je přiřazena adresa funkce, která odpovídá dalšímu stavu. Proměnná *sepnuto* slouží k informaci o sepnutí tyristorů. Jak lze pozorovat na obrázku 3.9, je splněna další podmínka, ve které se kontroluje doba sepnutí. Doba sepnutí je určena proměnnou *delkaPulzu*. Tato proměnná je porovnávána s proměnnou *cas*, která se během každého přerušení inkrementuje. Proměnná *delkaPulzu* udává, během kolika přerušení má být tyristor sepnut. Jak již bylo zmíněno, přerušení nastává každých 55 μ s. Pokud jsou tyto dvě proměnné rovny, dochází k vypnutí všech řídicích napětí na hradla tyristorů, vynulování proměnné *cas* a nastavení proměnné *sepnuto* na *false*.

Pokud dojde k zvolení jednofázového můstkového usměrňovače, tak vysílání pulzů probíhá podobným způsobem jako u šestipulzního usměrňovače. Stavový automat dvoupulzního usměrňovače obsahuje pouze dva stavy, jak lze vidět na obrázku 3.12. Pro stavový automat tohoto usměrňovače je deklarován nový ukazatel *stavovyAutomatPtr1*, jehož počáteční hodnota je nastavena na adresu funkce *s7_automat*.



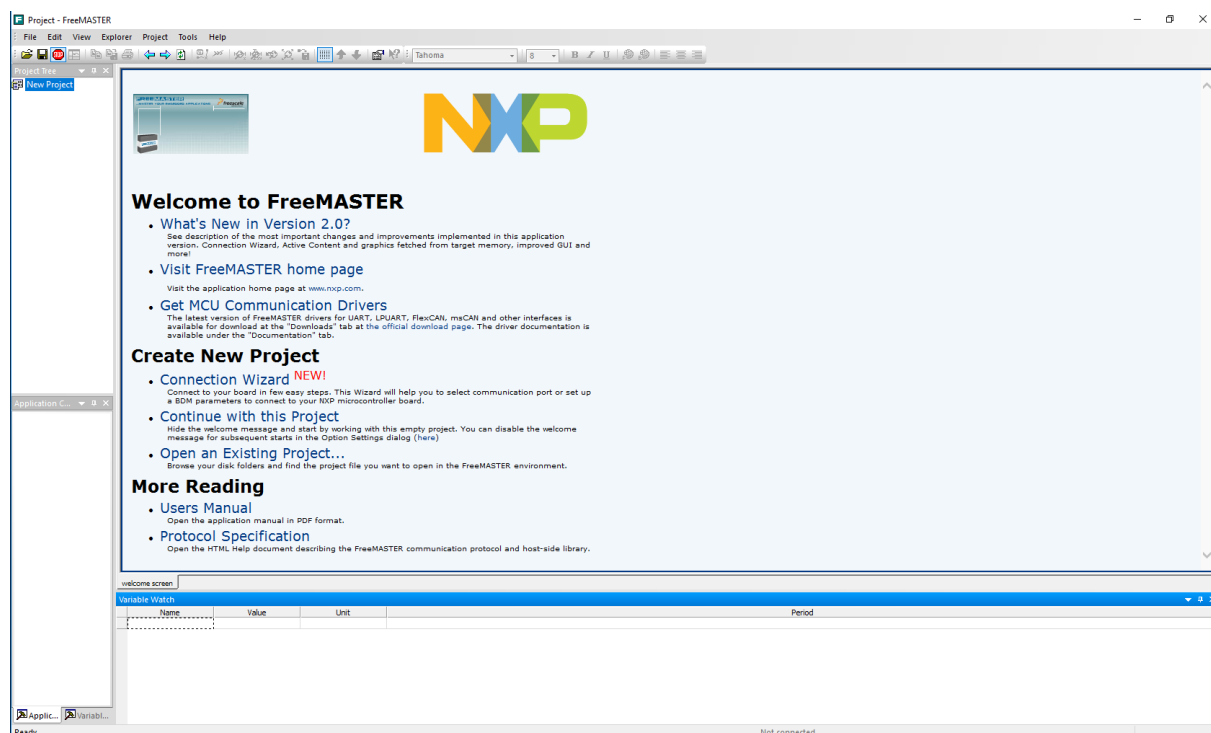
Obrázek 3.12: Vývojový diagram dvoupulzního usměrňovače

3.4 Ovládací software pro PC

Ke komunikaci s DSC je využíván program Freemaster, který umožňuje zapisovat a číst vnitřní proměnné z DSC. Tyto proměnné jsou poté zobrazovány v programu pomocí:

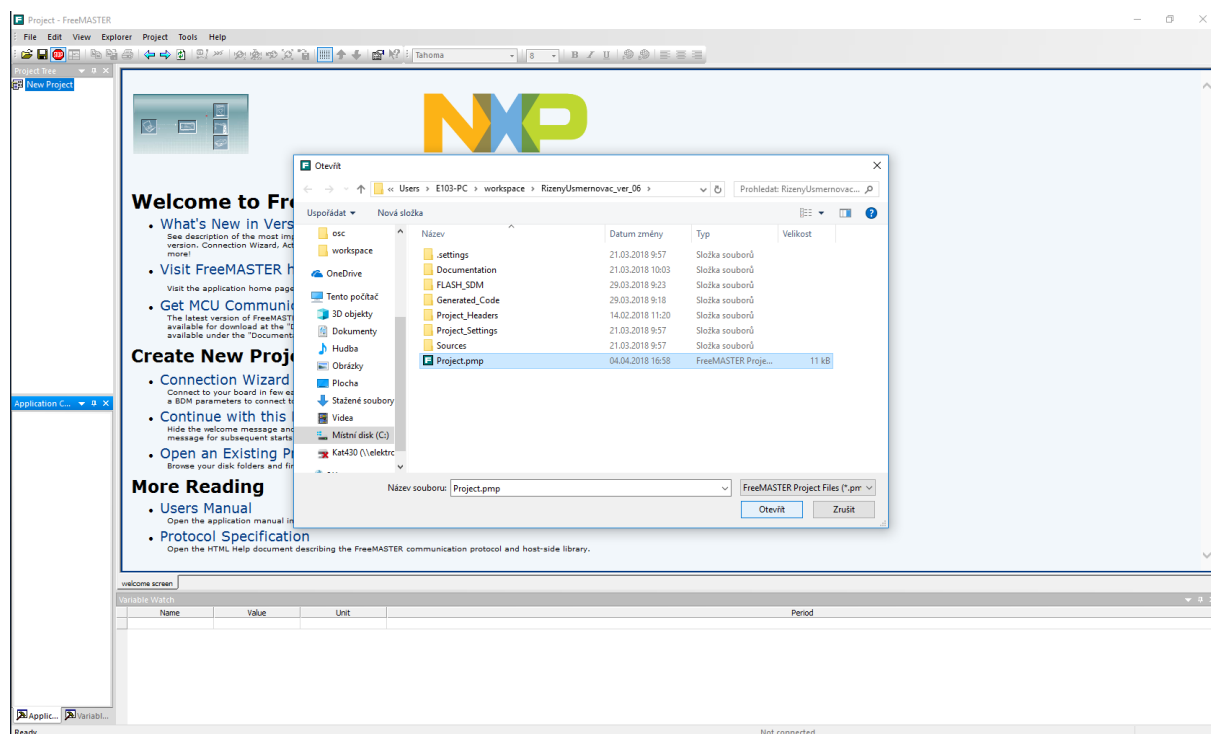
- Osciloskopu – umožňuje zobrazovat proměnné jako klasický osciloskop. V tomto případě je rychlost sledování omezena pouze rychlostí sériové komunikace. [7]
- Recorder – umožňuje zobrazovat proměnné, které se mění rychleji než vzorkovací frekvence osciloskopu. Zatímco osciloskop periodicky čte proměnné v reálném čase, recorder běží na daném DSC. Proměnné jsou ukládány do paměťového bufferu DSC, poté jsou tato uložená data nahrána do programu Freemaster. Recorder umožňuje mnohem rychlejší vzorkování proměnných. [7]

V další části této podkapitoly bude popsán program Freemaster a jeho nastavení. Po spuštění programu Freemaster se zobrazí jeho prostředí, které je zobrazeno na obrázku 3.13.



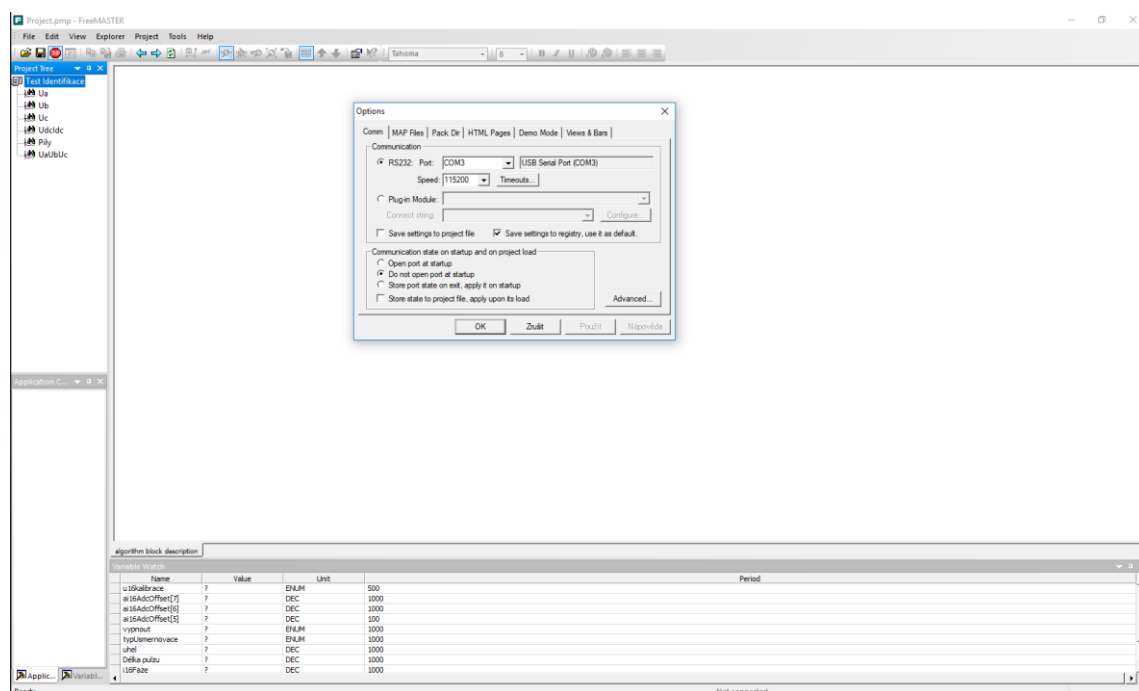
Obrázek 3.13: Prostředí programu Freemaster

Nyní je potřeba otevřít vytvořený projekt pro řídicí systém řízeného usměrňovače. Kliknutím na záložku *File* a poté na *open project* se otevře okno, které je zobrazené na obrázku 3.14.



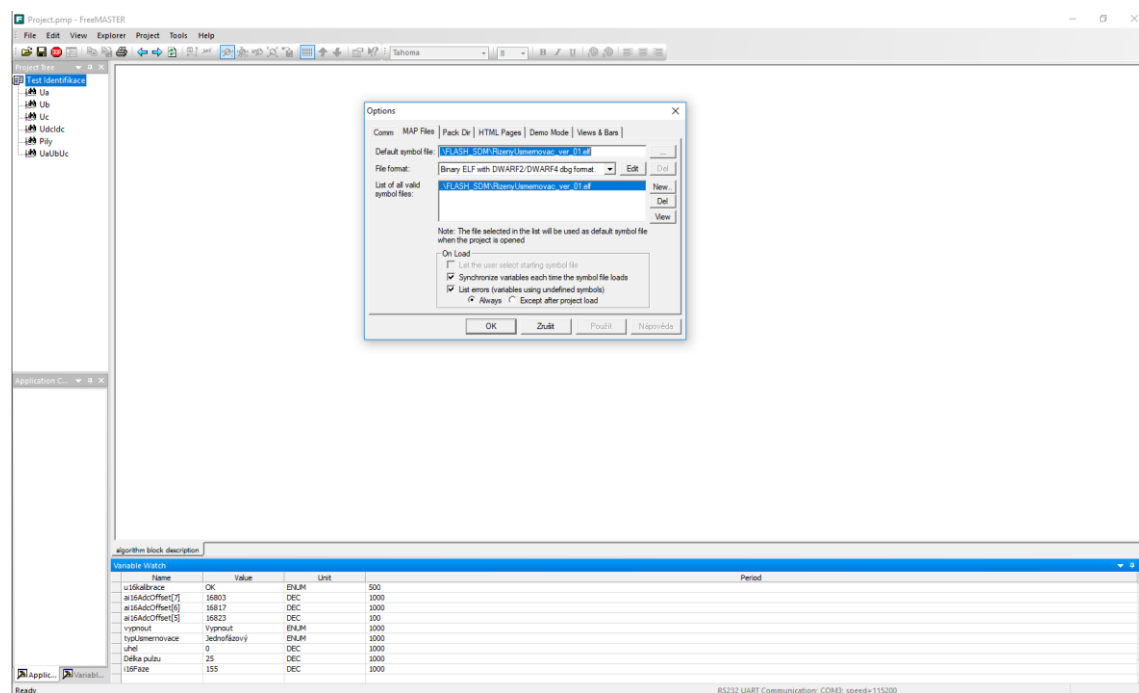
Obrázek 3.14: Otevření vytvořeného projektu

V otevřeném okně se vybere soubor *project.pmp* a klikne se na tlačítko otevřít. Tímto se otevře vytvořený projekt v programu Freemaster. Dále je nutné nastavit komunikaci kliknutím na záložku *Project* a následně na *Options*. Zobrazí se okno *Options*, jak lze pozorovat na obrázku 3.15.



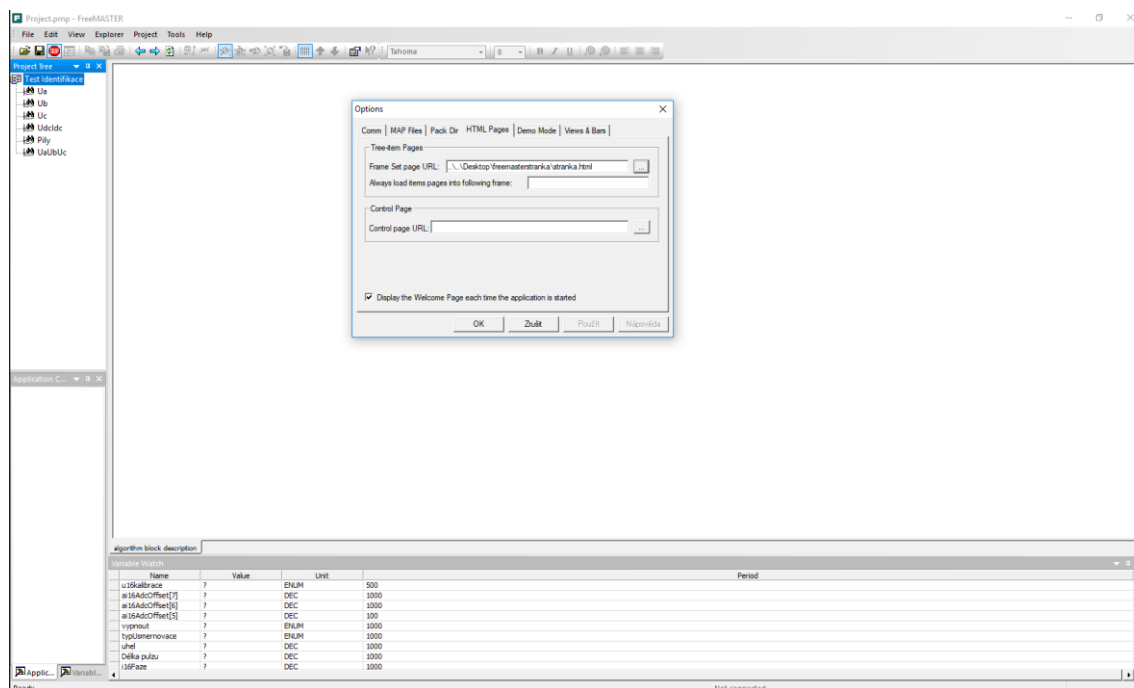
Obrázek 3.15: Nastavení komunikace

V záložce *Comm* se vybere port, ke kterému je připojen řídicí systém, a nastaví se přenosová rychlost, která je v tomto případě 115200 Bd. Dále se klikne na záložku *Map Files*.



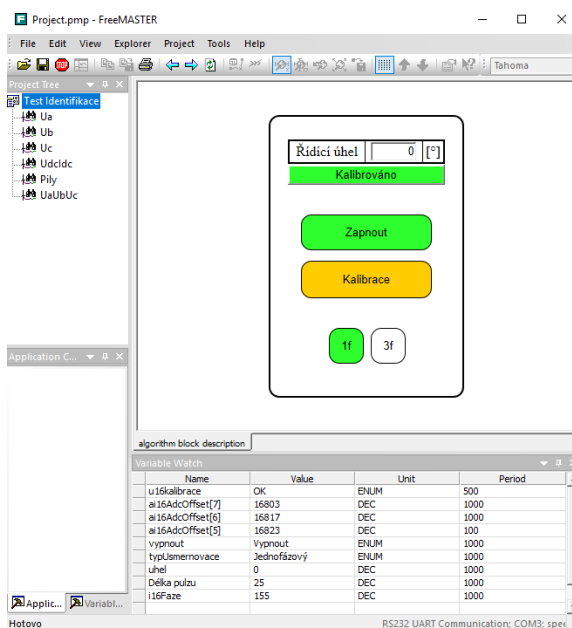
Obrázek 3.16: Nahrání souboru elf

V záložce *Map Files* se pomocí tlačítka (...) lokalizuje *elf* soubor. Tento soubor se nachází ve složce projektu z programu Codewarrior a je umístěn ve *FLASH_SDM*. V posledním kroku se klikne na záložku *HTML Pages*.



Obrázek 3.17: Nastavení html stránky

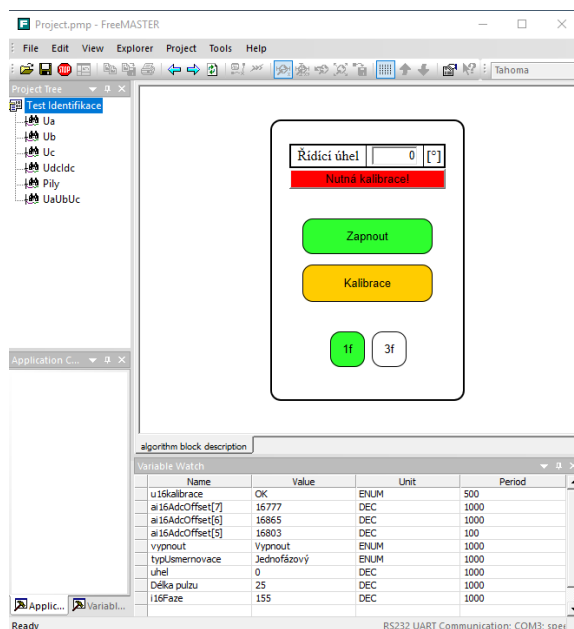
V záložce *HTML Pages* se nastavuje cesta k ovládacímu panelu vytvořeného jako *html* stránka. Ovládací panel obsahuje tři soubory s příponami *html*, *css* a *js*. Všechny tyto soubory musí být v jedné složce. Pomocí tlačítka (...) se lokalizuje soubor s příponou *html*. Poté stačí kliknout na tlačítko *OK*. Prostředí programu freemaster by mělo nyní vypadat jako na obrázku 3.18.



Obrázek 3.18: Prostředí programu freemaster s ovládacím panelem

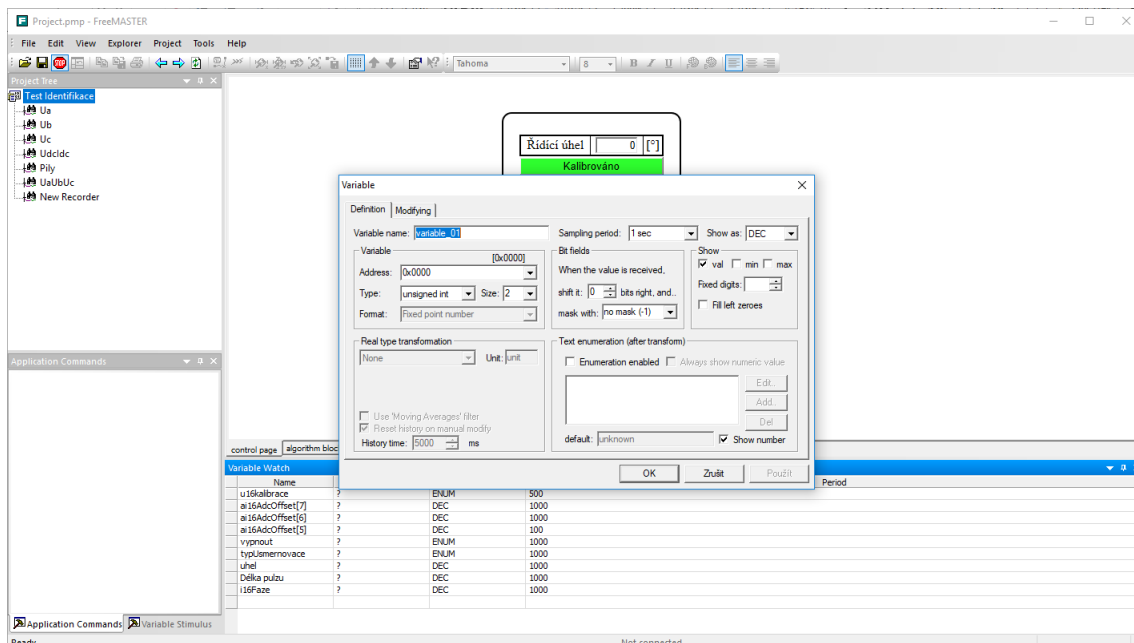
Po připojení řídicího systému k napájení je možné kliknout na červenou ikonu *STOP* umístěnou v horní liště. Tímto dojde k zapnutí komunikace. Ikonou se také komunikace vypíná.

Ovládací panel obsahuje čtyři tlačítka, informaci o kalibraci a pole k nastavení řídicího úhlu. Tlačítko *Zapnout* slouží k zapnutí řízeného usměrňovače. Po kliknutí na toto tlačítko dojde k změně jeho barvy na červenou a textu na *Vypnout*. Opětovným kliknutím na tlačítko *Vypnout* dojde k vypnutí usměrňovače a nastavení tlačítka do výchozí podoby. Tlačítka *1f* a *3f* slouží k nastavení typu řízeného usměrňovače. Typ usměrňovače určuje zelené zbarvení daného tlačítka. Tlačítko *Kalibrace* slouží ke kalibrování výstupních offsetů, jak bylo popsáno v podkapitole 3.3.1. Podmínkou pro kalibraci je mít odpojený pojistkový odpojovač, aby docházelo pouze ke kalibraci výstupních offsetů operačních zesilovačů. Kalibrace se provádí tehdy, když se zobrazí nápis *Nutná kalibrace!*. Tento stav lze vidět na obrázku 3.19. Poslední částí ovládacího panelu je pole k nastavení řídicího úhlu. Do pole lze zapsat maximálně číslo o třech číslicích a jeho maximální hodnota je dána bezpečnostním úhlem řízeného usměrňovače. Pokud je zadán úhel větší než tento maximální úhel, nedojde k jeho změně. Řídicí úhel se musí vždy po zadání potvrdit tlačítkem *Enter*.



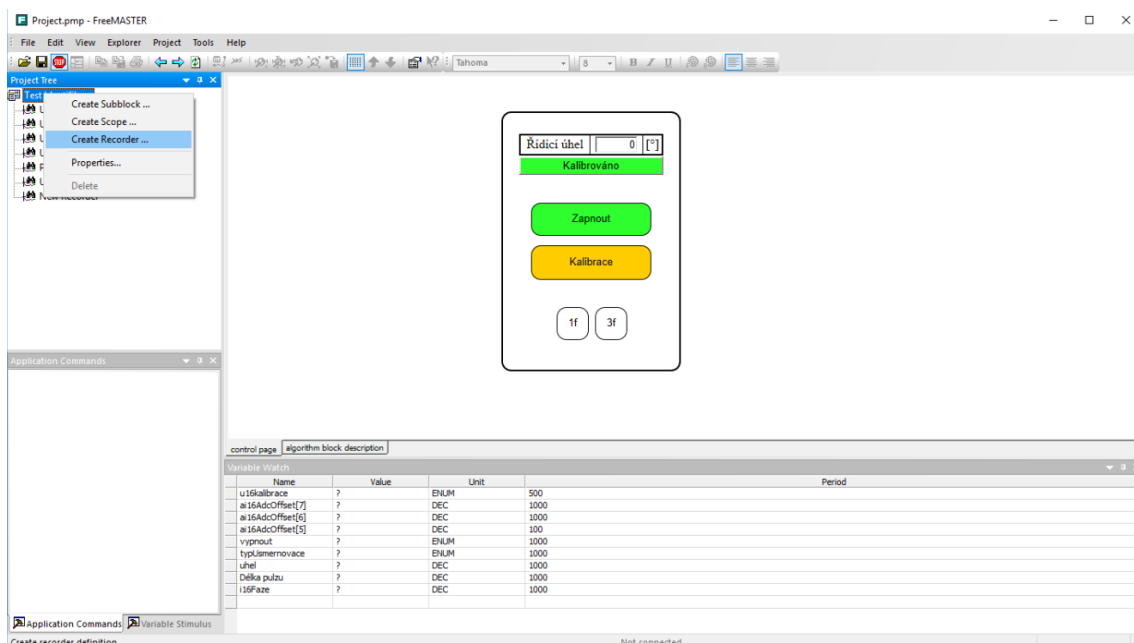
Obrázek 3.19: Prostředí programu freemaster s ovládacím panelem

V části *Variable Watch* je možné nastavit délku pulzu vysílaného na tyristory kliknutím na číslo ve sloupci *Value* v řádce *Délka pulzu*. Do *Variable Watch* je možné přidávat další proměnné. Pomocí pravého tlačítka na myši se klikne na prázdný řádek a vybere se *Create New Watched Var*. Zobrazí se okno *Variable*, které je vidět na obrázku 3.20.



Obrázek 3.20: Přidání nové proměnné do variable watch

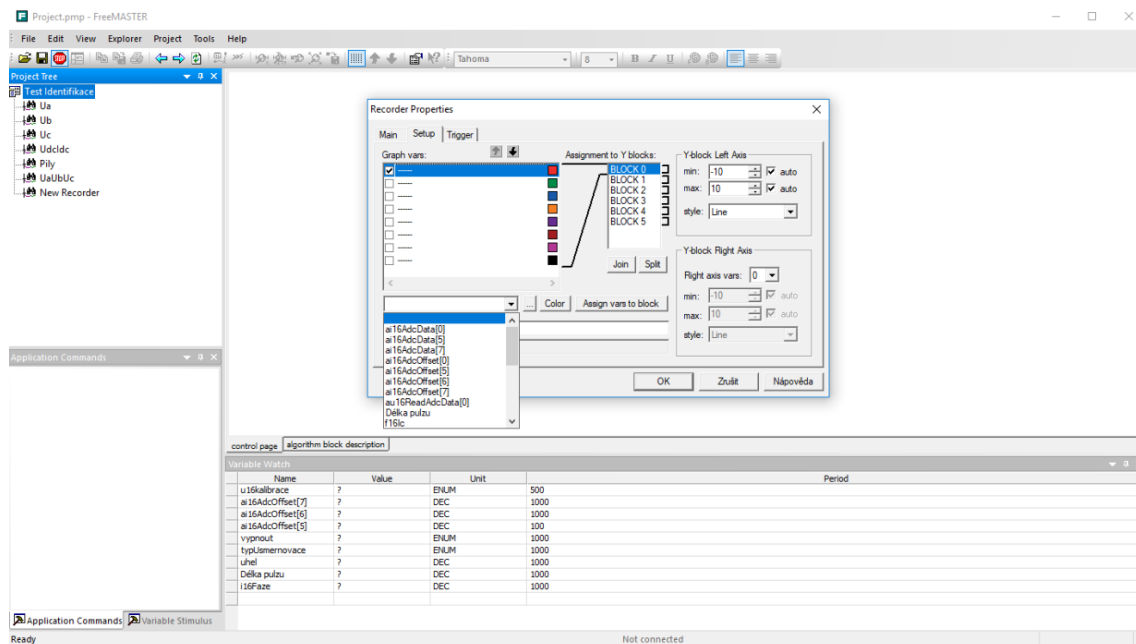
V okně *Variable* je v poli *Address* možné vyhledat danou proměnnou. Po vybrání této proměnné se nastavuje její typ v poli *Type*. Dále se nastaví vzorkovací perioda v poli *Sampling Period*. Nakonec lze nastavit název proměnné, pod kterým se bude zobrazovat ve *Variable Watch*, a typ zobrazovaného čísla v poli *Show as*. Dále v záložce *Modifying* je možné nastavit, jestli bude proměnná modifikována v programu Freemaster.



Obrázek 3.21: Vytvoření recorderu

Proměnné je možné zobrazovat i graficky pomocí recorderu. K vytvoření recorderu se klikne pravým tlačítkem myši na název projektu v *Project Tree*, který je v tomto případě *Test Identifikace*. Dále se klikne na *Create Recorder*, jak je zachyceno na obrázku 3.21.

Po kliknutí na *Create Recorder* se zobrazí okno *Recorder Properties*. V tomto okně se vybere záložka *Setup*, jak lze vidět na obrázku 3.22. V záložce *Setup* se v *Graph vars* označí čtvereček, který udává y osu v recorderu. Následně se z výsuvné lišty vybere proměnná, která má být zobrazena. Proměnné v této liště se zobrazí pouze tehdy, pokud jsou přidány do *Variable Watch*.

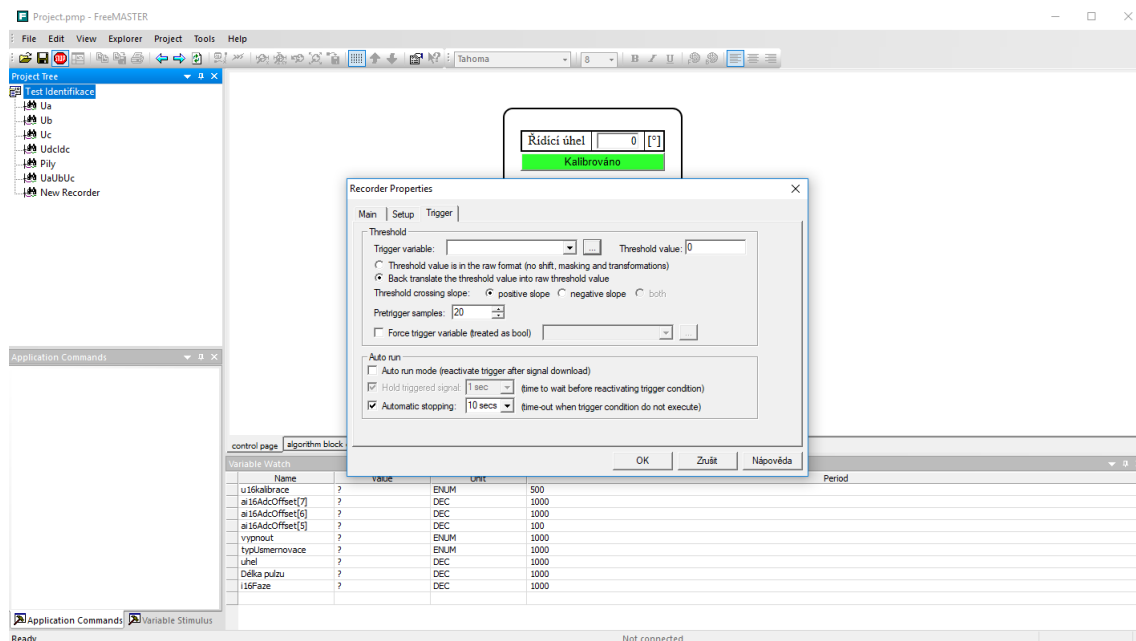


Obrázek 3.22: Nastavení proměnné v recorderu

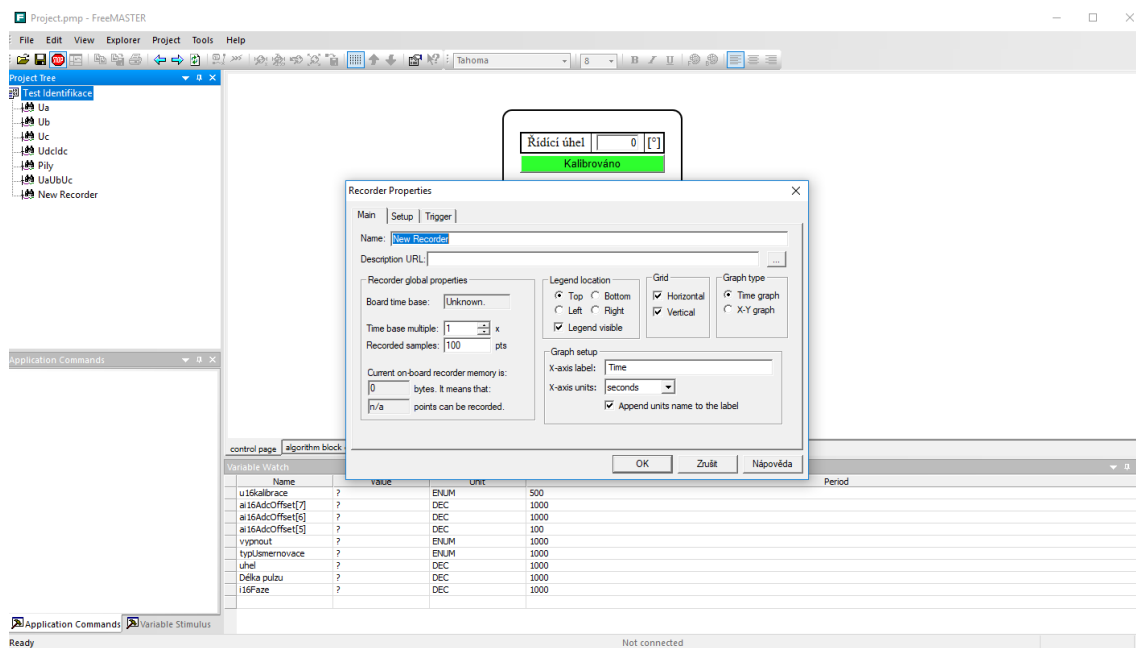
V kartě *Trigger* se nastaví, podle které proměnné se bude průběh recorderu spouštět. Na obrázku 3.23 je zobrazená záložka *Trigger*. V poli *Trigger Variable* se stanoví daná proměnná a v poli *Threshold Value* se nastavuje, v jaké hodnotě této proměnné dojde ke spuštění recorderu. Poté je vhodné nastavit *Auto run mode*, který vždy reaktivuje trigger po stáhnutí signálu z DSC.

Poslední část, kterou je nutné v recorderu nastavit, je umístěna v záložce *Main*. Zde se zadává, kolik vzorků bude recorder nahrávat a kolikrát bude časová osa násobena. Záložka *Main* je zobrazena na obrázku 3.24. Počet vzorků se nastavuje v poli *Recorded samples* a násobení časové osy v poli *Time base multiple*. Množství vzorků, které může recorder nahrát, lze pozorovat pod polem *Recorded Samples*. V této kartě je možné pojmenovat recorder v políčku *Name*. Kliknutím na tlačítko *OK* se v okně *Project Tree* zobrazí vytvořený recorder, na který stačí jen kliknout.

V programu Freemaster jsou již přednastavené recordery pro zobrazení sdružených napětí a jejich pilových průběhů, dále recordery pro usměrněné napětí a proud, jednotlivé pilové průběhy a zobrazení všech tří sdružených napětí v jednom recorderu.



Obrázek 3.23: Nastavení triggeru recorderu



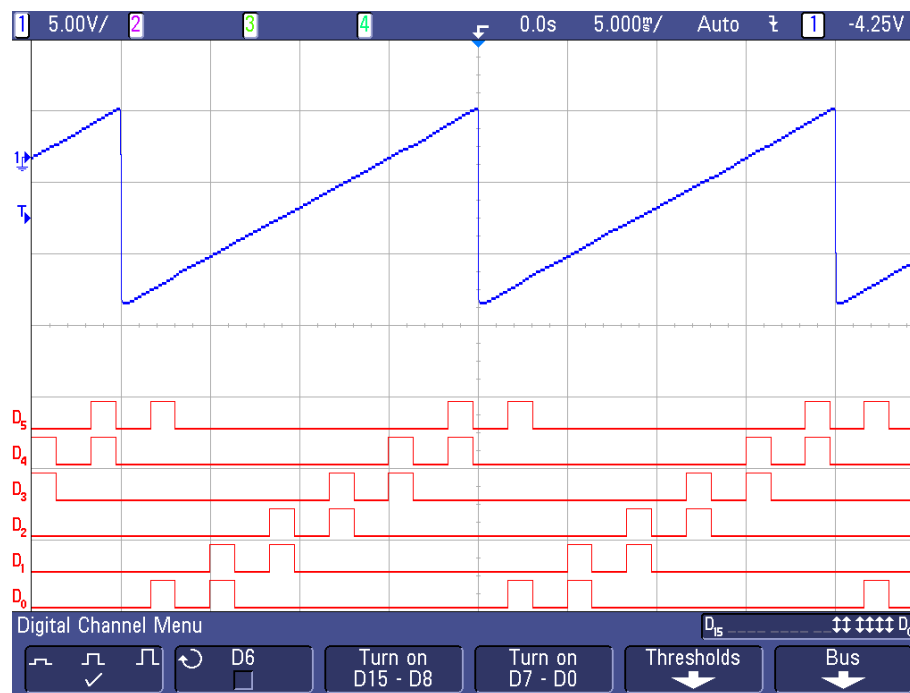
Obrázek 3.24: Nastavení nahrávaných vzorků recorderem

4 Ověření funkce řízeného usměrňovače

Měřením byla nejdříve ověřena funkčnost zdvojených spínacích pulzů vysílaných na budiče tyristorů pomocí osciloskopu Agilent MS06054A. Pulzy pro různé řídicí úhly jsou zobrazeny na obrázcích 4.1 až 4.4.



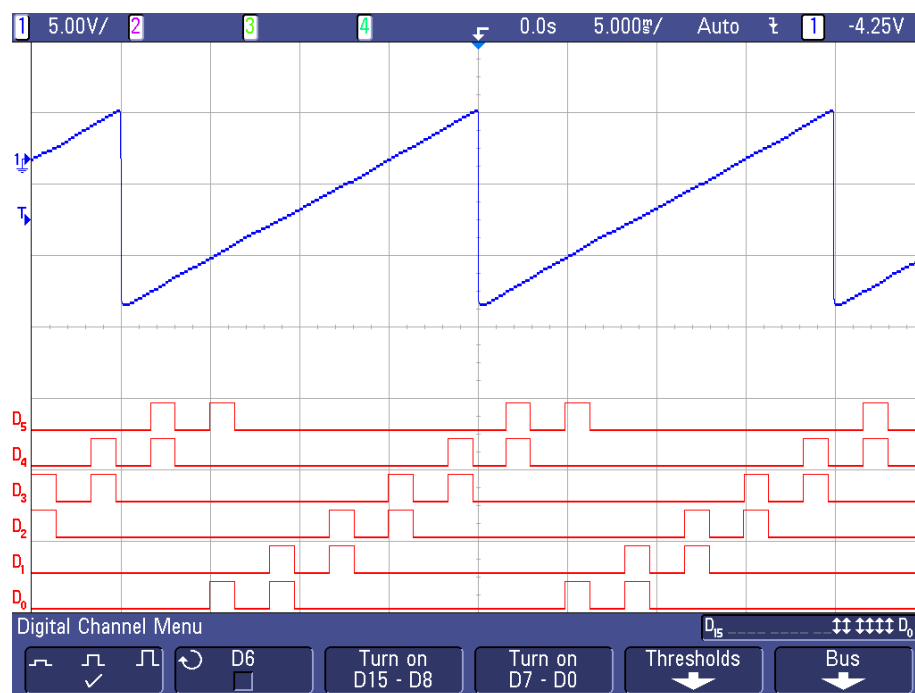
Obrázek 4.1: Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 0^\circ$



Obrázek 4.2: Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 30^\circ$

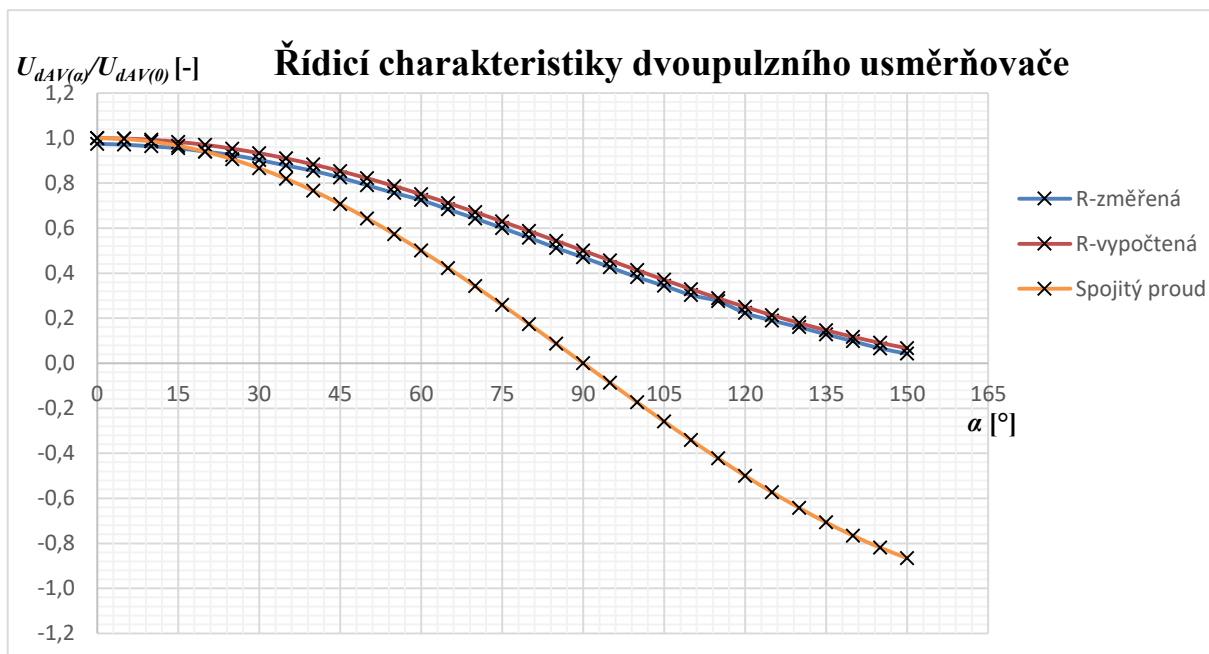


Obrázek 4.3: Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 60^\circ$

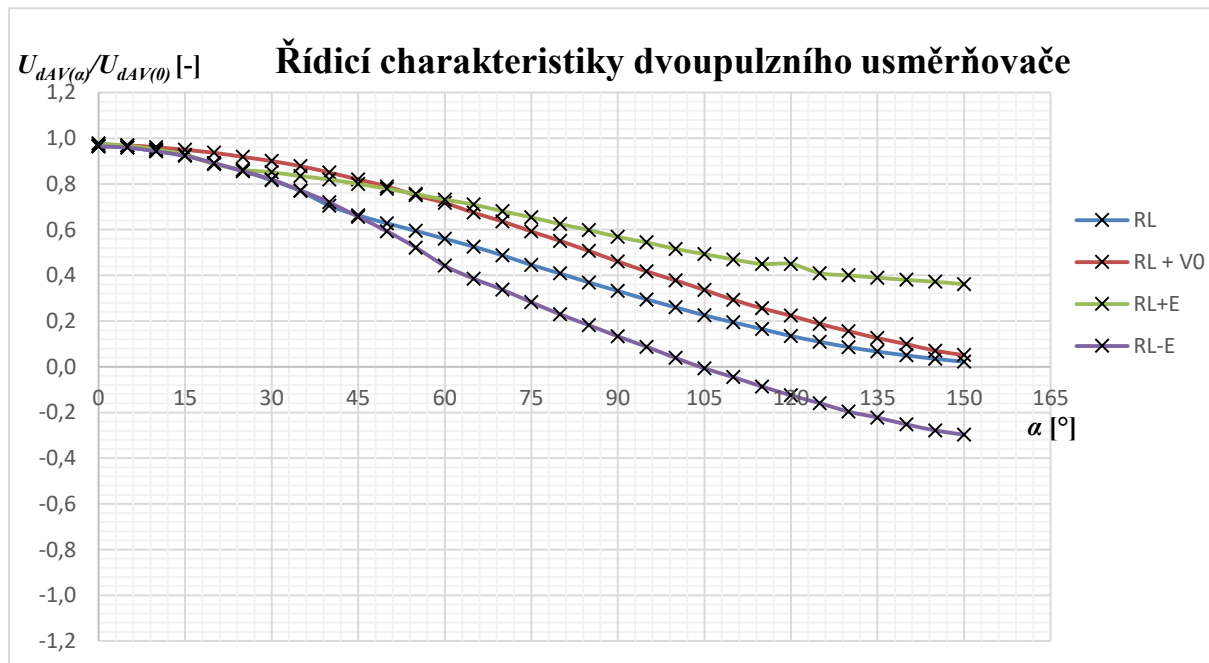


Obrázek 4.4: Zdvojené spínací pulzy tyristorů šestipulzního usměrňovače při $\alpha = 90^\circ$

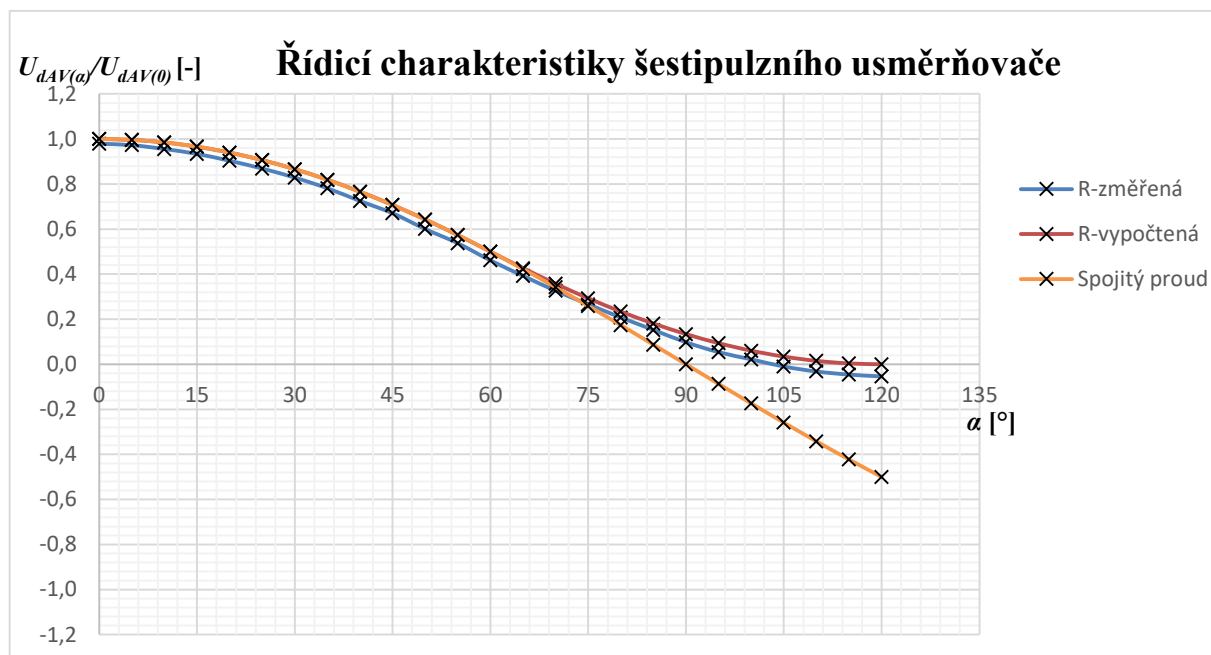
Měřením řídicích charakteristik byla ověřována funkčnost usměrňovače. Jeho připojením k odporové zátěži byla změřena řídicí charakteristika. Změřená i vypočtená řídicí charakteristika je vynesena do grafu. Měření se provádělo jak pro dvoupulzní usměrňovač, tak i pro šestipulzní. Řídicí charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 4.5 a 4.7. Dále se provádělo měření řídicích charakteristik s různými typy zátěže. Tyto řídicí charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 4.6 a 4.8



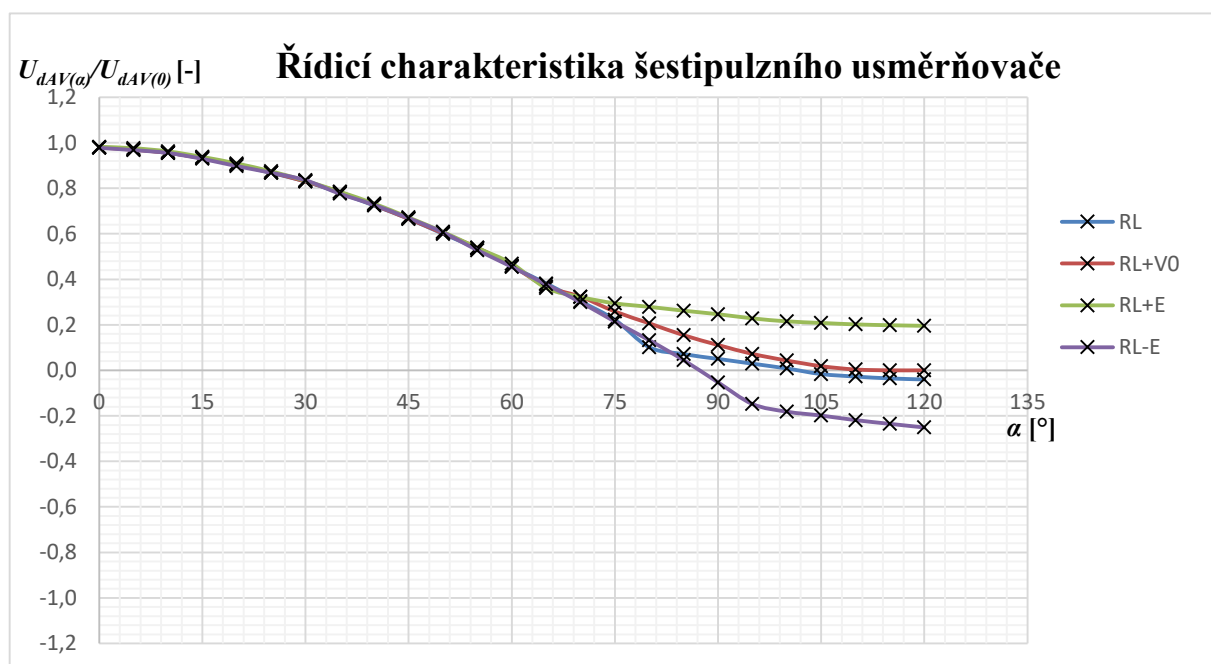
Obrázek 4.5: Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače



Obrázek 4.6: Řídicí charakteristiky dvoupulzního usměrňovače

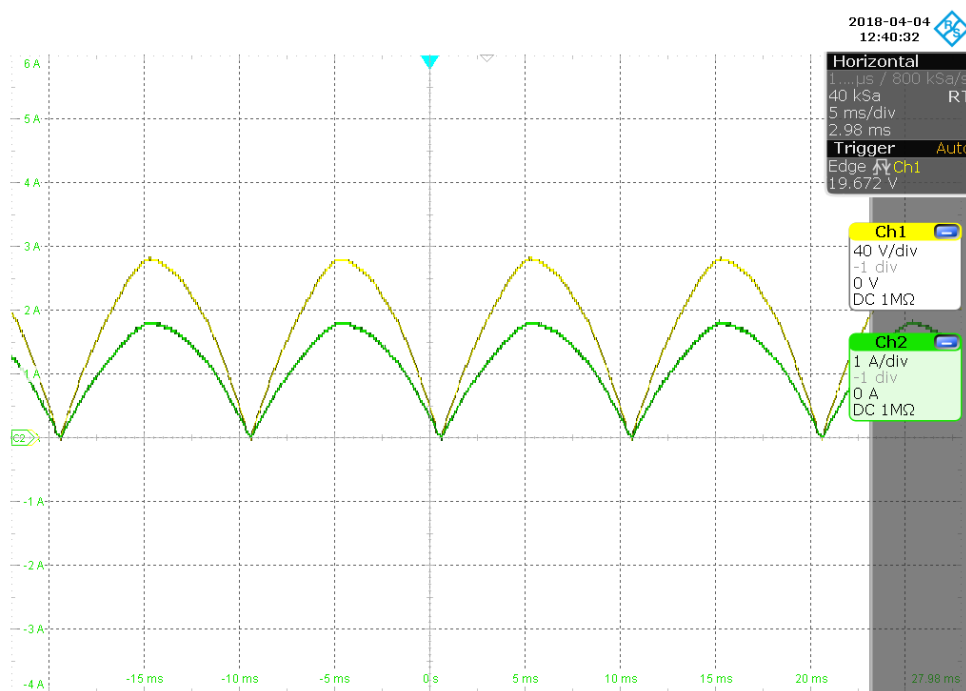


Obrázek 4.7: Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače

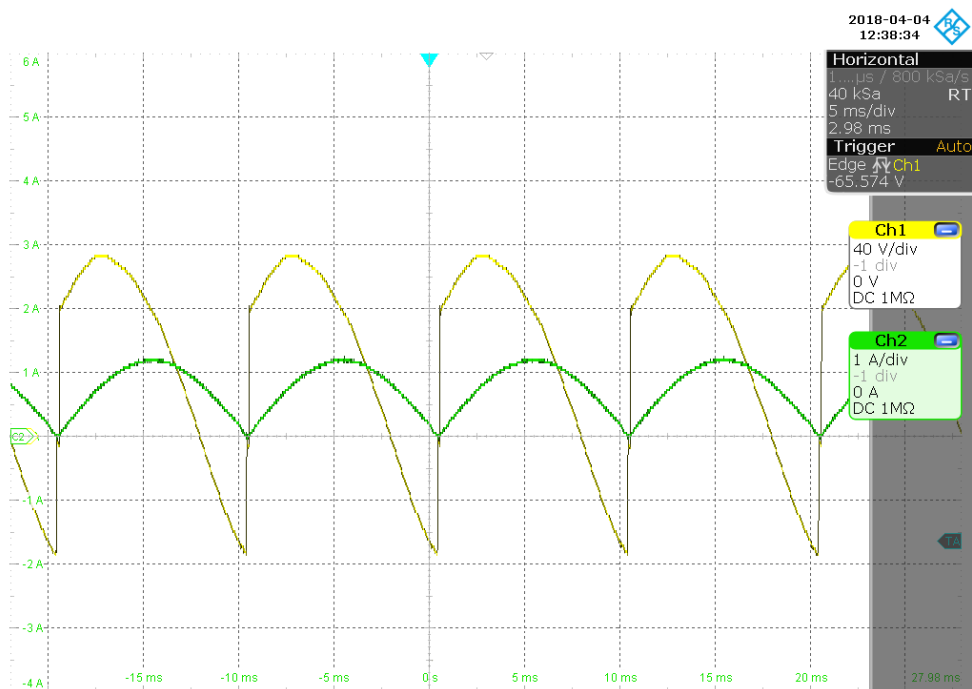


Obrázek 4.8: Řídicí charakteristiky šestipulzního usměrňovače

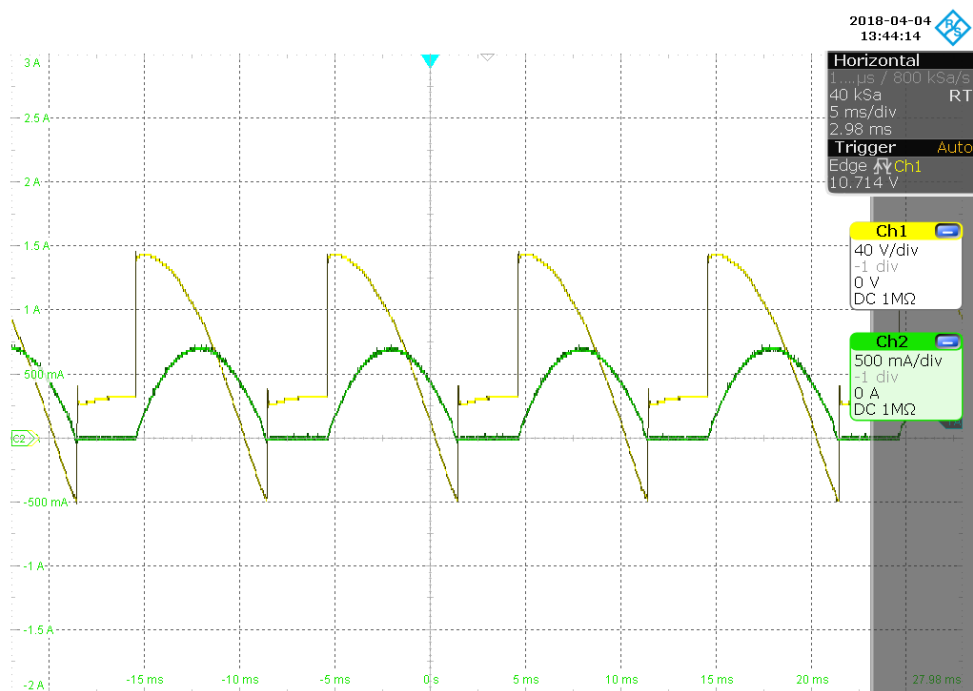
Pomocí osciloskopu RTE 1024 byl změřen výstupní průběh usměrněného napětí a proudu při různých typech zátěže. Průběhy pro dvoupulzní usměrňovač jsou zobrazeny na obrázcích 4.9 až 4.12. Pro šestipulzní usměrňovač jsou tyto průběhy zobrazeny na obrázcích 4.13 až 4.16.



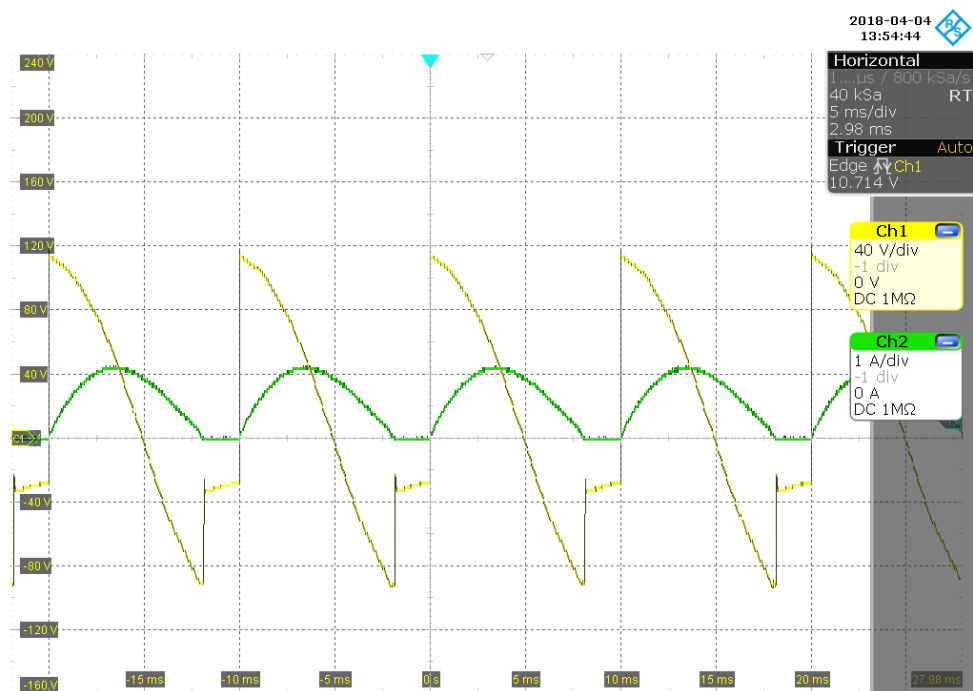
Obrázek 4.9: *Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při R zátěži $\alpha = 0^\circ$*



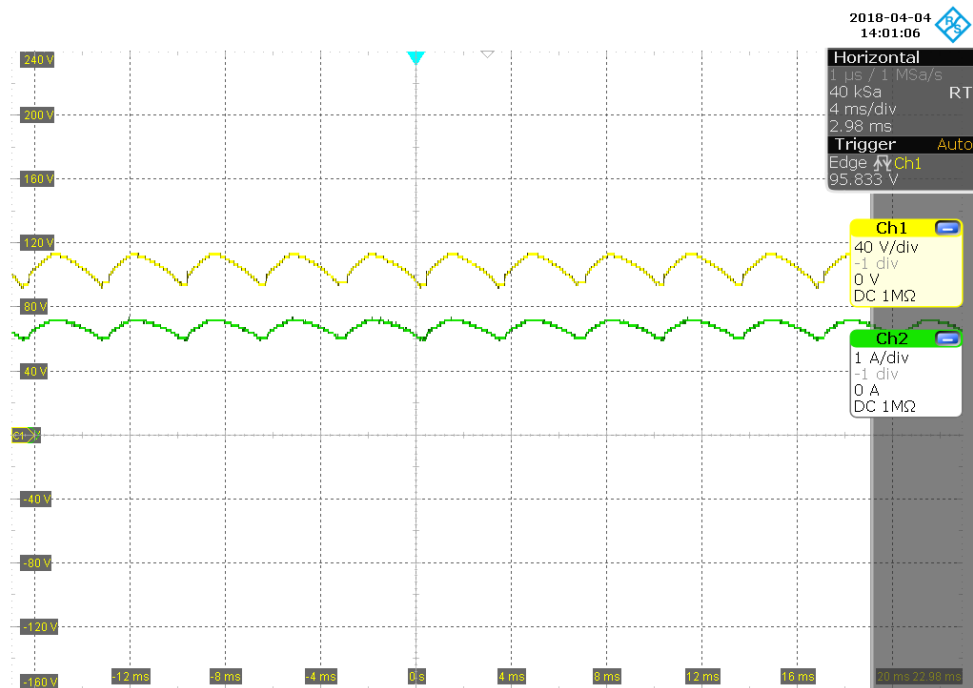
Obrázek 4.10: *Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při RL zátěži $\alpha = 45^\circ$*



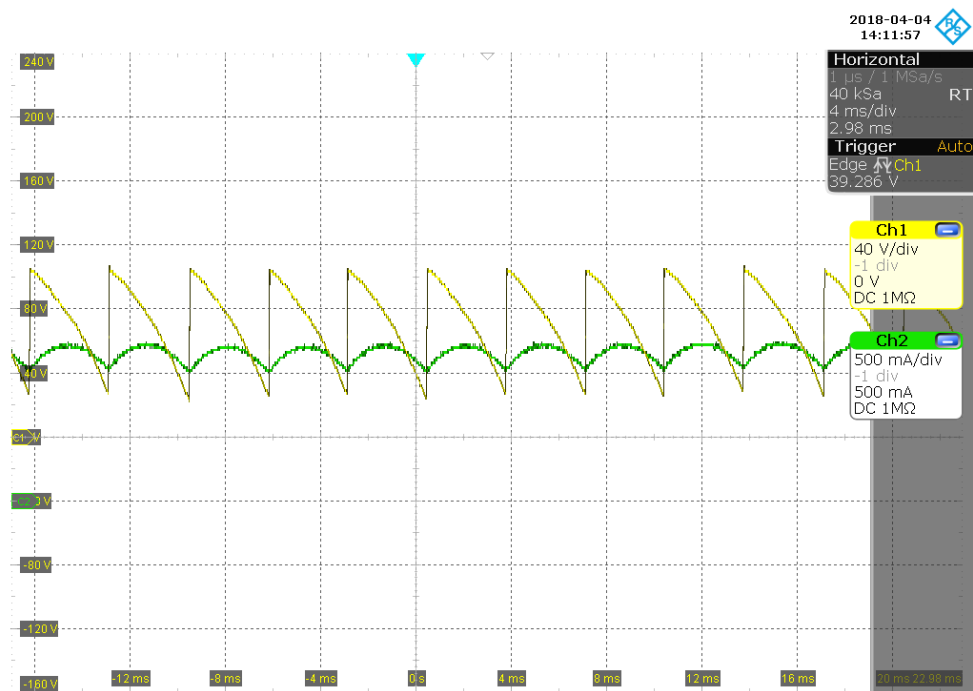
Obrázek 4.11: *Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při RL+E zátěži $\alpha = 75^\circ$*



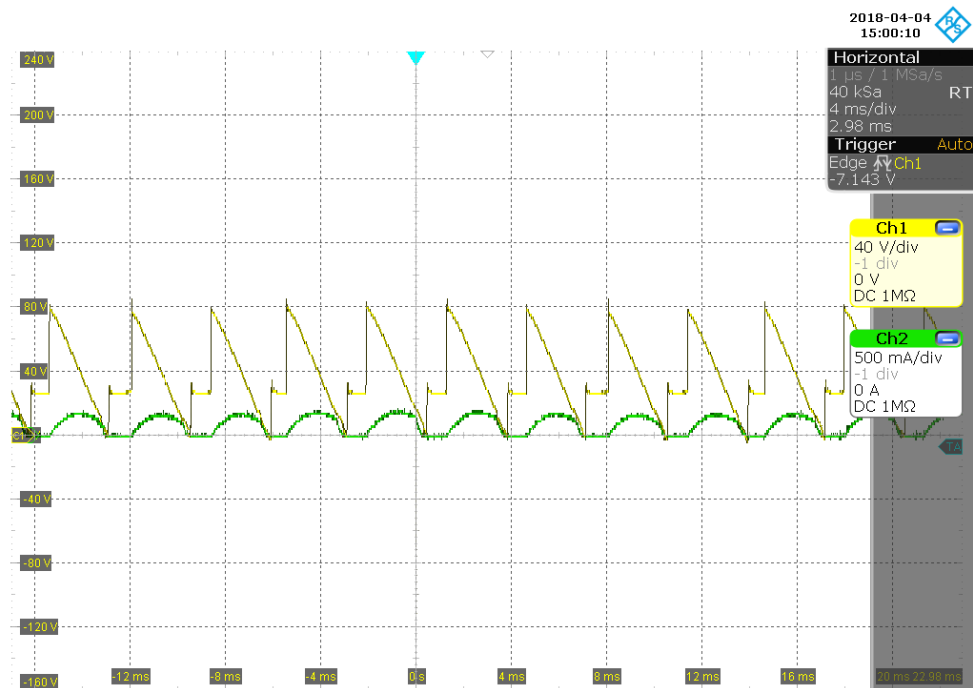
Obrázek 4.12: *Průběh usměrněného napětí a proudu dvoupulzního řízeného usměrňovače při RL-E zátěži $\alpha = 90^\circ$*



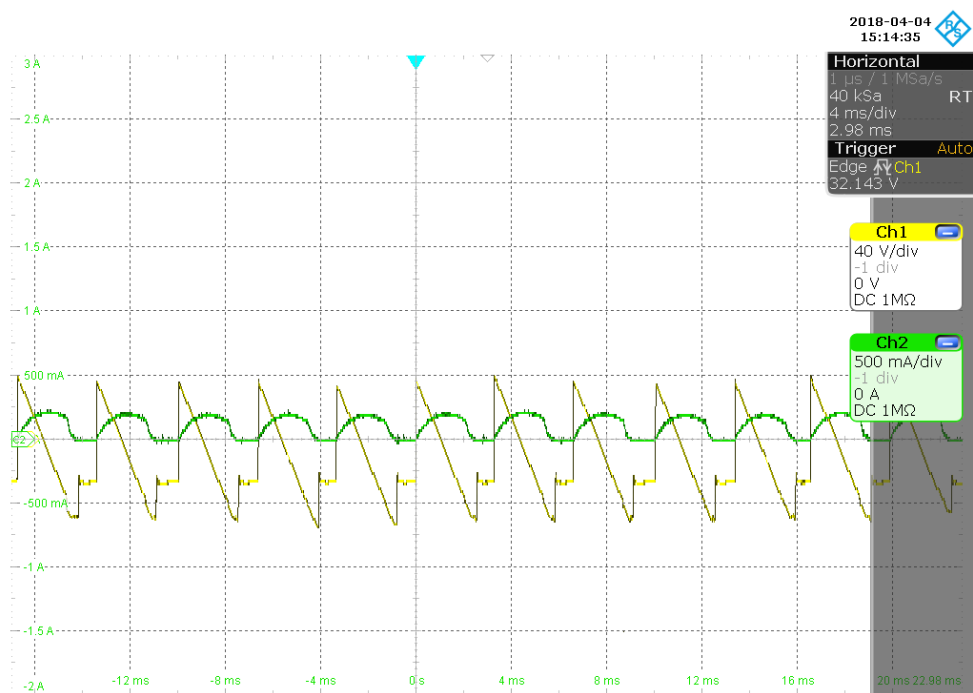
Obrázek 4.13: *Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při R zátěži $\alpha = 0^\circ$*



Obrázek 4.14: *Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při RL zátěži $\alpha = 45^\circ$*



Obrázek 4.15: *Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při RL+E zátěži $\alpha = 75^\circ$*



Obrázek 4.16: *Průběh usměrněného napětí a proudu šestipulzního řízeného usměrňovače při RL-E zátěži $\alpha = 100^\circ$*

Závěr

Cílem diplomové práce bylo rozšíření funkcí řízeného usměrňovače pro laboratorní výuku. Rozšíření spočívalo v uvedení řízeného usměrňovače do funkčního provozu a vytvoření ovládacího softwaru pro PC. K bezchybné funkci řízeného usměrňovače bylo nutné upravit desku budičů tyristorů, která nebyla optimálně navržena ke spínání tyristoru a potřebovala další desku plošných spojů k invertování pulzů z DSC. Dále byly upraveny desky čidel pro měření napětí a proudů, protože bylo měřeno fázové napětí místo sdruženého. Upravené desky plošných spojů a schémata zapojení jsou uvedeny v přílohách.

Další částí bylo vytvoření softwaru pro řídicí systém, jehož popis je uveden v kapitole č. 3. Při návrhu softwaru vznikl problém, při kterém nebylo možné synchronizovat sdružené napětí s pilovým průběhem. Tento problém spočíval v rušení během měření sdruženého napětí, proto byl v softwaru řídicího systému vytvořen filtr dolní propusti, který toto rušení z části odstranil. Dále musela být synchronizace doplněna kruhovým registrem, který si pamatoval hodnoty filtrovaného signálu zpožděné o 90°. Tímto se zajistilo, že zákmity kolem průchodu napětí nulou neovlivňovaly synchronizaci. V závěrečné části návrhu softwaru docházelo k tomu, že řídicí systém nezvládal během přerušení vyhodnotit všechny podmínky pro vysílání pulzů na tyristory. Problém byl odstraněn zjednodušením programu, a to stavovým automatem, který je uveden a popsán v kapitole č. 3.

Jako ovládací software pro PC byl použit program Freemaster, který je taktéž popsán v kapitole č. 3. Freemaster byl doplněn panelem vytvořeným v html, css a javascriptu. Pomocí panelu je možné přesně zadávat řídicí úhel, měnit typ usměrňovače a zapínat nebo vypínat usměrňovač.

Závěrečnou částí bylo ověření funkčnosti řídicího systému, a to měřením jednotlivých úloh z výkonové elektroniky, jejichž vzorové protokoly jsou uvedeny v přílohách.

Byl tedy vytvořen plně funkční řízený usměrňovač, který může být používán v laboratorní výuce. Řízený usměrňovač může být dále doplněn stykačem, aby odpadlo odpojování pojistkového odpojovače při kalibraci, a také čidlem teploty, které bude spínat ventilátor chladiče.

Použitá literatura





- [1] VONDŘÁŠEK, František. *Výkonová elektronika - svazek II* vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-485-9
- [2] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2003.
- [3] PAVELKA, Jiří a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. *Výkonová elektronika*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02094-0.
- [4] KŮS, Václav. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-062-8.
- [5] CHLEBIŠ, Petr. *Zpětné vlivy polovodičových měničů na napájecí síť*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2007.
- [6] MACÁT, Jaroslav., Polina VACULÍKOVÁ a Oldřich ZÁVISKA. *Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť*. Praha:SNTRL,1978.
- [7] MC56F8037 – technická dokumentace. NXP [online].[cit 2018-03-24]. Dostupné z www.nxp.com
- [8] FreeMASTER Run-Time Debugging Tool. – uživatelská příručka. NXP [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z www.nxp.com
- [9] SLIVKA, David. *Řídicí jednotka pohonu vozidla s palivovými články*. Ostrava, 2009. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [10] 74LS07 – dokumentace k bufferu od firmy Texas Instruments [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z www.ti.com
- [11] FT232RL – dokumentace k převodníku USB UART od firmy FTDI [online]. [cit. 2018-04-18]

Seznam příloh

Příloha A:	LÚ č. 1: Měření řídicích charakteristik dvoupulzního usměrňovače.....I
Příloha B:	LÚ č. 2: Měření řídicích charakteristik šestipulzního usměrňovače.....XVIII
Příloha C:	LÚ č. 3: Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje na komutaci usměrňovačů..XXXVI
Příloha D:	LÚ č. 4: Zpětné vlivy usměrňovačů na napájecí síť.....XLVII
Příloha E:	Schéma zapojení budiče tyristorů.....LIX
Příloha F:	Deska plošných spojů budiče tyristorů.....LX
Příloha G:	Schéma zapojení čidel pro měření usměrněného napětí a proudu.....LXI
Příloha H:	Deska plošných spojů čidel pro měření usměrněného napětí a proudu.....LXII
Příloha I:	Schéma zapojení čidel pro měření sdružených napětí.....LXIII
Příloha J:	Deska plošných spojů čidel pro měření sdružených napětí.....LXIV
Příloha K:	Schéma zapojení čidel pro měření fázových proudů.....LXV
Příloha L:	Deska plošných spojů čidel pro měření fázových proudů.....LXVI
Příloha M:	Měřicí stanoviště.....LXVII

Příloha na CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

-  Diplomová práce
-  Ovládací panel
-  RizenyUsmernovacKod
-  Usměrnovač přestavba